

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Г. М. Макаренко

К. Л. Бринкевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ: В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Учебно-методическое пособие для студентов
технических специальностей

Новополоцк

ПГУ

2012

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

Одобрено и рекомендовано к изданию
учебно-методической комиссией геодезического факультета
в качестве учебно-методического пособия (протокол № 3 от 22.10.2010)

Кафедра физики

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. пед. наук, доц., зав. каф. общей физики и астрономии УО «Витебский
государственный университет им. П. М. Машерова» И. В. ГАЛУЗО;
канд. техн. наук, доц. каф. физики УО «Полоцкий государственный универси-
тет» Ю. П. ГОЛУБЕВ

© Макаренко Г. М., Бринкевич К. Л., 2012
© УО «Полоцкий государственный университет», 2012

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

1. Эмиссионные явления и их изменение

Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для совершения работы выхода, то часть электронов может покинуть металл, в результате чего наблюдается явление испускания электронов, или электронной эмиссии. В зависимости от способа сообщения электронам энергии различают термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную и автоэлектронную эмиссии.

1.1. Термоэлектронная эмиссия

Это испускание электронов нагретыми металлами, когда энергия, необходимая для совершения электронами работы выхода, сообщается им путем нагрева тела.

В металлах при нормальных температурах имеются свободные электроны, находящиеся в непрерывном и беспорядочном тепловом движении. Если электрон покинул поверхность металла, то в этой точке поверхности образуется избыточный положительный заряд, который взаимодействует с отрицательно заряженным электроном. Под действием кулоновской силы притяжения электрон возвращается на поверхность металла. Наиболее быстрые электроны вылетают из металла и удаляются от его поверхности на несколько межатомных расстояний. В результате около поверхности образуется электронное облако, имеющее отрицательный заряд, а поверхность металла заряжается положительно. Этот своеобразный конденсатор противодействует вылету электронов из металла. Для того чтобы удалить электрон из металла, надо совершить работу. Наименьшая величина этой работы называется работой выхода. Она равна

$$A = e\phi,$$

где e – заряд электрона; ϕ – потенциал выхода.

Работа выхода измеряется в электрон-вольтах (эВ) – это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в один вольт.

При любой температуре некоторые электроны обладают энергией, достаточной для того, чтобы покинуть поверхность металла.

Они вылетают из поверхности металла, и совершается работа выхода, равная убыли их кинетической энергии:

$$e\phi = \frac{m\nu_1^2}{2} - \frac{m\nu_2^2}{2},$$

где m – масса электрона; e – заряд электрона; ν_1^2 и ν_2^2 – скорости электрона до и после выхода из металла (у поверхности).

При комнатной температуре количество электронов, имеющих скорость, достаточную для вылета, невелико.

Существует несколько способов сообщения электронам дополнительной энергии, необходимой для удаления их из металла: нагревание проводника, облучение металлов видимым и ультрафиолетовым светом (фотоэлектронная эмиссия); воздействие сильного ускоряющего внешнего электрического поля (автоэлектронная или холодная эмиссия); бомбардировка металла электронами или ионами.

Для исследования термоэлектронной эмиссии используют установку, состоящую из двух электродов, – анода А и катода К, которые помещены в вакуум (катод – в виде нити, анод – цилиндра), (рис. 1).

Катод является источником электронов, подогревается батареей накала B_H . Анодная батарея B_A служит для создания электрического поля E_{en} между катодом и анодом.

Когда нить разогрета, возникает электронное облако, несущее отрицательный заряд.

В результате включения батареи B_A поток электронов движется между К и А, т.е. в цепи начинает протекать электрический ток.

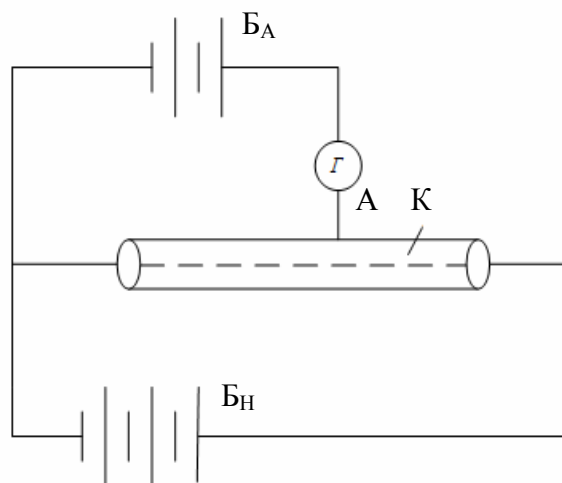


Рис. 1

Сила тока зависит от температуры нити, напряжения U_a (которое создает анодная батарея), материала катода и размеров электродов.

Если поддерживать температуру катода постоянной и снять зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a – вольт-амперную характеристику (рис. 2), то оказывается, что она не является линейной, т.е. закон Ома не выполняется.

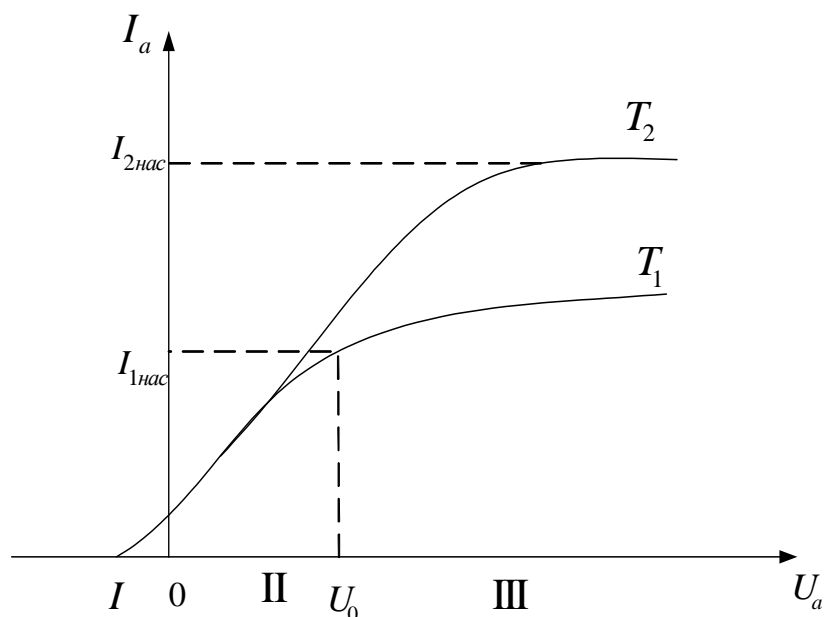


Рис. 2

Выделяют три области: первая соответствует случаю, когда к электродам прикладывается задерживающая разность потенциалов (к аноду подключается (-) батареи), т.е. поле $E_{вн}$ тормозит электроны. Но ток в цепи идет, т.к. часть электронов, вылетающих из раскаленной нити, имеют энергию, достаточную для преодоления задерживающей разности потенциалов.

Эта часть вольт-амперной характеристики называется **кривой задержки**. Кроме электрического поля $E_{вн}$, создаваемого анодной батареей, между анодом и катодом существует еще поле, образованное летящими электронами. Электроны, движущиеся от катода к аноду, создают определенный **объемный заряд**, который вызывает электрическое поле $E_{об}$.

Накладывающееся на поля $E_{вн}$, поля электрического облака $E_{об}$ будет тормозить электроны при их вылете из катода и ускорять их при под-

лете к аноду. При увеличении разности потенциалов U_a поле $E_{об.}$ будет уменьшаться. Поэтому все большее количество электронов станет долетать до анода, и сила тока будет расти (область II).

Зависимость термоэлектронного тока I от анодного напряжения в области малых положительных значений U описывается **законом трех вторых**

$$I = BU^{\frac{3}{2}},$$

где B – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

При некотором значении разности потенциалов ($U_a = U_0$) суммарное поле $E_{вн.} = E_{об.}$ у катода станет равным нулю. В этом случае все вылетающие электроны будут достигать анода. Поэтому дальнейшее повышение U_a не приведет к увеличению анодного тока I . Сила тока станет постоянной (область III). Такой ток называется **током насыщения**.

Сила тока насыщения, при прочих равных условиях, зависит от температуры катода. Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона – Дешмана, выведенной теоретически на основе квантовой статистики:

$$j_{нас.} = CT^2 e^{\frac{-A}{kT}},$$

где A – работа выхода электронов из катода; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; C – постоянная, теоретически одинаковая для всех металлов; e – основание натурального логарифма.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакууме, например, в электронных лампах, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т.д.

Электронные лампы широко применяются в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике для выпрямления переменных токов, усиления электрических сигналов и переменных токов, генерирования электромагнитных колебаний и т.д.

1.2. Фотоэлектронная эмиссия

Это эмиссия электронов из металла под действием света, а также коротковолнового электромагнитного излучения (например, рентгенового).

Фотоэлектронная эмиссия широко используется для исследования энергетической структуры веществ, для химического анализа (фотоэлектронная спектроскопия), в измерительной аппаратуре, в звуковоспроизводящей киноаппаратуре и в приборах автоматики (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители), в передающих телевизионных трубках (супериконоскоп, суперортикон), в инфракрасной технике (электроннооптический преобразователь) и в др. приборах, предназначенных для регистрации излучений рентгеновского, ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн. С основными закономерностями этого явления познакомимся при рассмотрении фотоэлектрического эффекта.

1.3. Вторичная электронная эмиссия

Это испускание электронов поверхностью твердого тела при ее бомбардировке электронами. Открыта в 1902 г. немецкими физиками Л. Остином и Г. Штарке. Электроны, бомбардирующие тело, называются первичными, испущенные – вторичными. Часть первичных электронов отражается телом без потери энергии (упруго отраженные первичные электроны), остальные – с потерями энергии (неупруго отраженные электроны), расходуемой в основном на возбуждение электронов твердого тела, переходящих на более высокие уровни энергии. Если их энергия и импульс оказываются достаточно большими для преодоления потенциального барьера на поверхности тела, то электроны покидают поверхность тела (истинно вторичные электроны). Все три группы электронов присутствуют в регистрируемом потоке вторичных электронов (рис. 3).

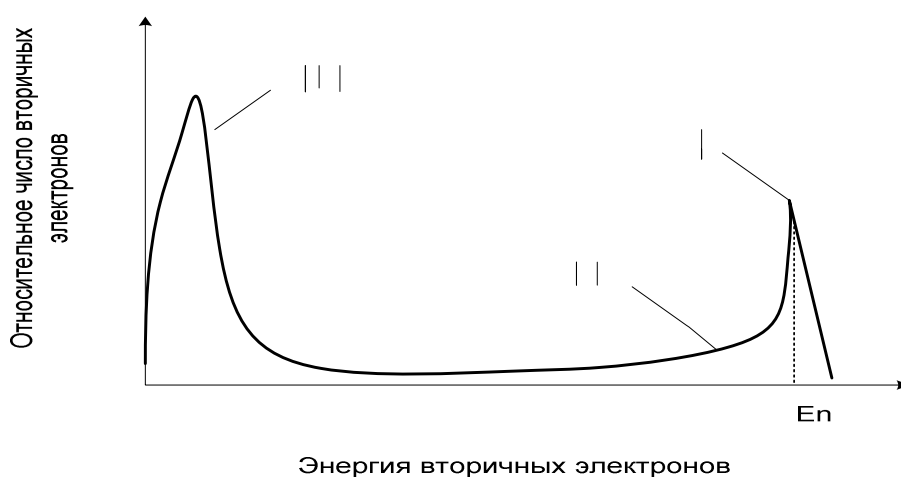


Рис. 3. Распределение вторичных электронов по энергиям: I – упруго отраженные электроны; II – неупруго отраженные электроны; III – собственно вторичные электроны; E_n – энергия первичных электронов

В тонких пленках вторичная электронная эмиссия наблюдается не только с той поверхности, которая подвергается бомбардировке (эмиссия на отражение, рис. 4, *а*), но и с противоположной поверхности (эмиссия на прострел, см. рис. 4, *б*).

Количественно вторичная электронная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной электронной эмиссии $\sigma = I_{em}/I_n$, где I_{em} – ток, образованный вторичными электронами; I_n – ток первичных электронов; коэффициентами упругого $r = I_r/I_n$ и неупругого $\eta = I_\eta/I_n$ отражения электронов, а также коэффициентом эмиссии истинно вторичных электронов $\delta = I_\delta/I_n$ (где I_r , I_η , I_δ – токи, соответствующие упруго отраженным, неупруго отраженным и истинно вторичным электронам, $I_{em} = I_r + I_\eta + I_\delta$).

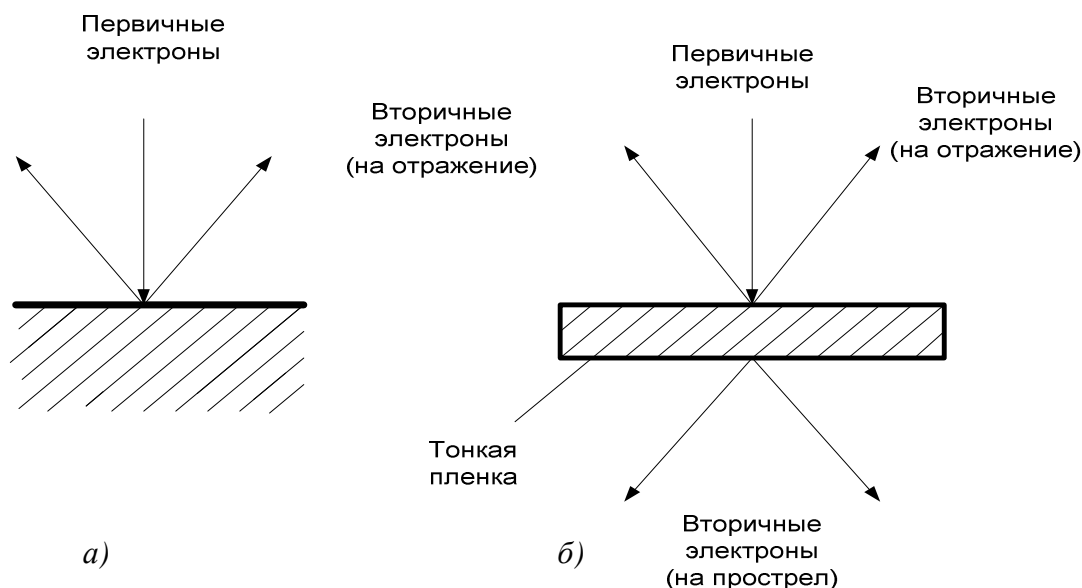


Рис. 4. Вторичная электронная эмиссия на отражение (*а*) и на прострел (*б*)

Коэффициенты σ , r , η и δ зависят как от энергии первичных электронов E_n и угла их падения, так и от химического состава, метода изготовления и состояния поверхности облучаемого образца. В металлах, где плотность электронов проводимости велика, образовавшиеся вторичные электроны имеют малую вероятность выйти наружу. В диэлектриках, где концентрация электронов проводимости мала, вероятность выхода вторичных электронов больше. Вместе с тем вероятность выхода электронов зависит от высоты потенциального барьера на поверхности. В результате у ряда неметаллических веществ (окислы щелочноземельных металлов, щелочногалогенидные соединения) $\sigma > 1$ (рис. 5).

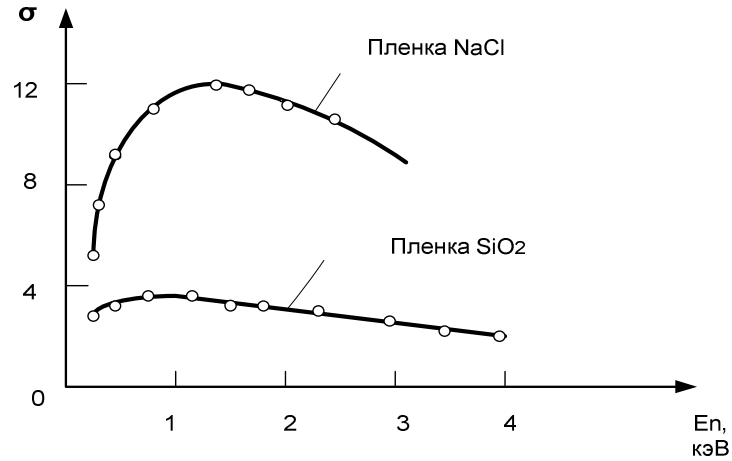


Рис. 5. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_n

У специально изготовленных эффективных эмиттеров (интерметаллические соединения типа сурмянощелочных металлов, специальным образом активированные сплавы CuAlMg, AgAlMg, AgAlMgZi и др.), коэффициент вторичной электронной эмиссии $\sigma \approx 1$.

У металлов же и собственных полупроводников значение σ сравнительно невелико (рис. 6).

У углерода (сажи) и окислов переходных металлов $\sigma < 1$, и они могут применяться как антиэмиссионные покрытия.

С увеличением энергии E_n первичных электронов σ сначала возрастает (см. рис. 5, 6).

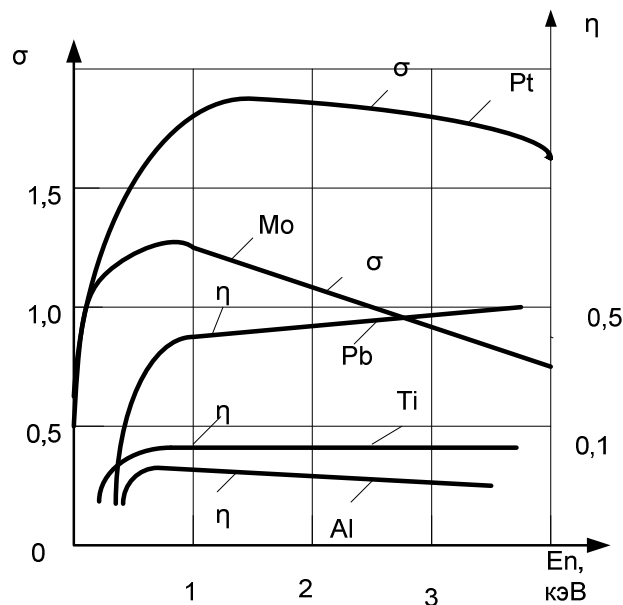


Рис. 6. Зависимость коэффициентов σ и η от энергии первичных электронов E_n для некоторых металлов

Самостоятельное значение получило исследование и применение вторичной электронной эмиссии в сильных электростатических полях и электрических полях сверхвысоких частот. Создание в диэлектрике сильного электрического поля ($10^5 - 10^6$ В/см) приводит к увеличению σ до 50 – 100 (вторичная электронная эмиссия, усиленная полем). Кроме того, в этом случае величина σ существенно зависит от пористости диэлектрического слоя, так как наличие пор увеличивает эффективную поверхность эмиттера, а поле способствует «вытягиванию» медленных вторичных электронов, которые, ударяясь о стенки пор, могут вызвать, в свою очередь, вторичную электронную эмиссию с $\sigma > 1$ и возникновение электронных лавин. Развитие лавин при определенных условиях приводит к самоподдерживающейся холодной эмиссии, продолжающейся в течение многих часов после прекращения бомбардировки электронами.

Вторичная электронная эмиссия применяется во многих электровакуумных приборах для усиления электронных потоков (фотоэлектронные умножители, усилители изображений и т.д.) и для записи информации в виде потенциального рельефа на поверхности диэлектрика. В ряде приборов вторичная электронная эмиссия является «вредным» эффектом (динактронный эффект в электронных лампах, появление электрического заряда на поверхности стекла и диэлектриков в электровакуумных приборах).

В высокочастотном электрическом поле $E = E_0 \cos \omega t$, вследствие вторичной электронной эмиссии на поверхностях электродов наблюдается явление лавинообразного размножения электронов (вторично-электронный резонанс). Это явление открыто Х.Э. Фарнсуортом в 1934 г. Для возникновения резонанса необходимо, чтобы время между двумя последовательными соударениями электронов с поверхностями электродов (рис. 8, а) было равно нечетному числу полупериодов высокочастотного поля E (условия синхронизма). При этом электроны могут приобрести в поле энергию, при которой $\sigma > 1$. Размножение электронов происходит на поверхностях двух электродов, между которыми приложено высокочастотное электрическое поле, или на одной поверхности, помещенной в скрещенные электрическое и магнитное поля (см. рис. 8, б).

Быстрое нарастание концентрации электронов ограничивается ростом пространственного заряда, что нарушает условие синхронизма. Явление вторичного электронного резонанса играет существенную роль в механизме возникновения плотного прикатодного объемного заряда в магнетронах и амплитронах, а также в механизме работы динамических фотоэлектронных

умножителей, применяемых для усиления слабых электрических полей. С другой стороны, это явление может быть причиной нестабильной работы этих приборов и может ограничивать их выходную мощность.

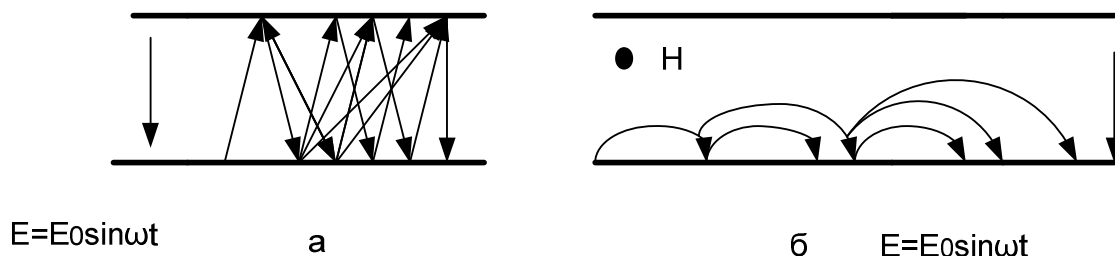


Рис. 8. Размножение электронов в высокочастотном электрическом поле (а) и в скрещенных электрическом E и магнитном H полях (б). Поле H перпендикулярно к плоскости чертежа; стрелками показаны траектории электронов

1.4. Автоэлектронная эмиссия

Открытие явления автоэлектронной эмиссии в 1897 г. связано с именем замечательного экспериментатора Роберта Вуда. При исследовании вакуумного разряда Вуд заметил в сильном электрическом поле испускание электронов, наблюдая свечение стекла под их воздействием, и описал это явление.

Это явление испускания электронов в вакуум с поверхности твердого тела или другой среды под действием очень сильного электрического поля напряженностью $E = 10^7 - 10^8$ В/см. Для того чтобы создать такие сильные электрические поля, к обычным макроскопическим электродам необходимо было бы прикладывать напряжения в десятки миллионов вольт. Практически автоэлектронную эмиссию можно возбудить при гораздо меньших напряжениях, если придать катоду форму тонкого острия с радиусом вершины в десятые или сотые доли микрона. Сейчас реализованы условия, когда при микроскопических расстояниях катод – анод, равных единицам или долям микрона, и очень малых радиусах кривизны катода $r = 20 - 50 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$) автоэмиссию удается получать при напряжениях всего в сотни и даже десятки вольт. Среди эмиссионных явлений автоэмиссия занимает особое место, так как это чисто квантовый механизм.

Открытие автоэлектронной эмиссии привело к появлению совершенно новой области микро- и нанoeлектроники, так называемой вакуумной микроэлектроники, позволило создать новые фундаментальные методы исследования топологии поверхности с атомным разрешением (сканирующая электронная микроскопия сверхвысокого разрешения, туннельная микроскопия, электронная голография и др.).

2. Электропроводность газов

Все газы в естественном состоянии не проводят электрического тока, в чем можно убедиться из следующего опыта.

Возьмем электрометр с присоединенными к нему дисками плоского конденсатора и зарядим его. При комнатной температуре, если воздух достаточно сухой, конденсатор заметно не разряжается – положение стрелки электрометра не изменяется. Чтобы заметить уменьшение угла отклонения стрелки электрометра, требуется длительное время. Это указывает на то, что электрический ток в воздухе между дисками очень мал. Опыт показывает, что воздух является плохим проводником электрического тока.

Видоизменим опыт: нагреем воздух между дисками пламенем спиртовки. Теперь угол отклонения стрелки электрометра быстро уменьшается, т.е. уменьшается разность потенциалов между дисками конденсатора – конденсатор разряжается. Следовательно, нагретый воздух между дисками стал проводником и в нем устанавливается электрический ток.

Изолирующие свойства газов объясняются тем, что в них нет свободных электрических зарядов – атомы и молекулы газов в естественном состоянии являются нейтральными.

Вышеописанный опыт показывает, что в газах под влиянием высокой температуры появляются заряженные частицы. Они возникают вследствие отщепления от атомов газа одного или нескольких электронов, в результате чего вместо нейтрального атома возникают положительный ион и электроны. Часть образовавшихся электронов может быть при этом захвачена другими нейтральными атомами, и тогда появятся еще отрицательные ионы. Распад молекул газа на электроны и положительные ионы называется **ионизацией газов**. Нагревание газа до высокой температуры не является единственным способом ионизации молекул или атомов газа. Ионизация газа может происходить под влиянием различных внешних воздействий: сильного нагрева газа, рентгеновских лучей, α -, β - и γ -лучей, возникающих при радиоактивном распаде, космических лучей, бомбардировки молекул газа быстро движущимися электронами или ионами. Факторы, вызываю-

щие ионизацию газа, называются *ионизаторами*. Количественной характеристикой процесса ионизации служит *интенсивность ионизации*, измеряемая числом пар противоположных по знаку заряженных частиц, возникающих в единице объема газа за единицу времени.

Ионизация атома требует затраты определенной энергии – энергии ионизации. Для ионизации атома (или молекулы) необходимо совершить работу против сил взаимодействия между вырываемым электроном и остальными частицами атома (или молекулы). Эта работа называется работой ионизации A_i . Величина работы ионизации зависит от химической природы газа и энергетического состояния вырываемого электрона в атоме или молекуле.

После прекращения действия ионизатора количество ионов в газе с течением времени уменьшается, и в конце концов ионы исчезают вовсе. Исчезновение ионов объясняется тем, что ионы и электроны участвуют в тепловом движении и поэтому соударяются друг с другом. При столкновении положительного иона и электрона они могут воссоединиться в нейтральный атом. Точно также при столкновении положительного и отрицательного ионов отрицательный ион может отдать свой избыточный электрон положительному иону, и оба иона превратятся в нейтральные атомы. Этот процесс взаимной нейтрализации ионов называется *рекомбинацией ионов*. При рекомбинации положительного иона и электрона или двух ионов освобождается определенная энергия, равная энергии, затраченной на ионизацию. Частично она излучается в виде света, и поэтому рекомбинация ионов сопровождается свечением (свечение рекомбинации).

В явлениях электрического разряда в газах большую роль играет ионизация атомов электронными ударами. Этот процесс заключается в том, что движущийся электрон, обладающий достаточной кинетической энергией, при соударении с нейтральным атомом выбивает из него один или несколько атомных электронов, в результате чего нейтральный атом превращается в положительный ион, а в газе появляются новые электроны (это будет рассмотрено позднее).

В таблице ниже даны значения энергии ионизации некоторых атомов.

Элемент	He	Ne	Ar	Hg	Na	K	Rb
Энергия ионизации, эВ	24,5	21,5	13,9	10,4	5,12	4,32	4,68

Механизм проводимости газов похож на механизм проводимости растворов и расплавов электролитов. При отсутствии внешнего поля заряженные частицы, как и нейтральные молекулы, движутся хаотически. Если

ионы и свободные электроны оказываются во внешнем электрическом поле, то они приходят в направленное движение и создают электрический ток в газах.

Таким образом, **электрический ток в газе представляет собой направленное движение положительных ионов к катоду, а отрицательных ионов и электронов – к аноду.** Полный ток в газе складывается из двух потоков заряженных частиц: потока, идущего к аноду, и потока, направленного к катоду.

На электродах происходит нейтрализация заряженных частиц, как и при прохождении электрического тока через растворы и расплавы электролитов. Однако в газах отсутствует выделение веществ на электродах, как это имеет место в растворах электролитов. Газовые ионы, подойдя к электродам, отдают им свои заряды, превращаются в нейтральные молекулы и диффундируют обратно в газ.

Еще одно различие в электропроводности ионизованных газов и растворов (расплавов) электролитов состоит в том, что отрицательный заряд при прохождении тока через газы переносится в основном не отрицательными ионами, а электронами, хотя проводимость за счет отрицательных ионов также может играть определенную роль.

Таким образом, в газах сочетается электронная проводимость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов и расплавов электролитов.

Различают несамостоятельную и самостоятельную проводимость газов. В первом типе носители зарядов создаются с помощью внешних ионизаторов, во втором типе носители зарядов создаются в самом газе в результате процессов, обусловленных приложенным электрическим полем.

Существенную роль в процессе разряда газа играет геометрия электродов, температура, давление и приложенное напряжение.

2.1. Закон Ома при несамостоятельной проводимости газов

Процесс прохождения электрического тока через газ называется газовым разрядом. Если электропроводность газа создается внешними ионизаторами, то электрический ток, возникающий в нем, называется **несамостоятельным газовым разрядом.** С прекращением действия внешних ионизаторов несамостоятельный разряд прекращается. Несамостоятельный газовый разряд не сопровождается свечением газа.

Схема опыта показана на рис. 9. В этой схеме U – ионизатор, создающий ионы в газе, заполняющем межэлектродный промежуток; S –

площадь электрода; d – расстояние между электродами; R – сопротивление; Γ – гальванометр.

Пусть в состоянии равновесия в единице объема имеется n_0 положительных и отрицательных ионов. Для равновесия необходимо, чтобы за единицу времени и в единице объема число создаваемых ионов было равно числу исчезающих ионов. Из создаваемых ионизатором Δn_u пар ионов (в единице объема и за единицу времени) Δn_m ионов уносится током на электроды (из единицы объема межэлектродного промежутка и за единицу времени).

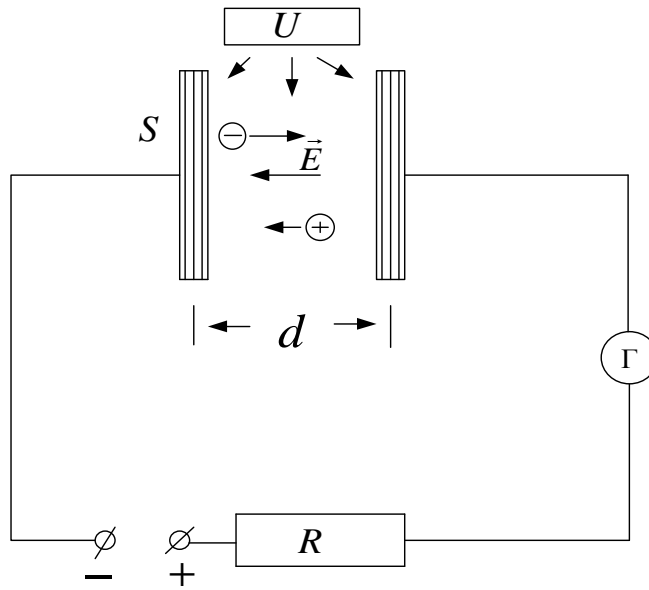


Рис. 9

Легко понять, что если q – заряд иона, а ΔQ – количество электричества, перенесенного на электроды за время Δt , то

$$\Delta n_m = \frac{\Delta Q}{q \Delta t S d}.$$

Так как сила тока $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, а плотность тока $j = \frac{I}{S}$, то $\Delta n_m = \frac{j}{qd}$.

Уменьшение числа ионов в межэлектродном промежутке происходит и по другой причине – вследствие рекомбинации ионов (образование нейтральной молекулы при столкновении положительных и отрицательных ионов). Пусть Δn_p – число пар ионов, рекомбинирующих в единицу времени и в единицу объема.

Так как вероятность встречи ионов пропорциональна концентрации положительных и отрицательных ионов, то $\Delta n_p = \gamma n_0^2$, где γ – коэффици-

ент рекомбинации, зависящий от природы газа. В состоянии равновесия должно выполняться соотношение $\Delta n_n = \gamma n_0^2 + \frac{j}{qd}$.

Рассмотрим два важных частных случая. Первый случай, когда $\frac{j}{qd} \leq \gamma n_0^2$, реализуется при достаточно слабом электрическом поле \vec{E} в межэлектродном промежутке. Будем считать, что движение иона в газе можно уподобить движению частицы в вязкой среде.

Отсюда вытекает, что на ион действует две силы – электрическая $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$ и сила трения $\vec{F}_{тр} = -k\vec{V}$, где k – коэффициент трения, а \vec{V} – направленная скорость иона.

До тех пор, пока $\vec{F}_{эл} > \vec{F}_{тр}$, ион движется ускоренно. С момента, когда $\vec{F}_{эл} = -\vec{F}_{тр}$, движение иона станет равномерным. Из равенства сил вытекает соотношение $V \sim E$, которое выражает закон Ома.

Таким образом, закон Ома соблюдается в рассматриваемом частном случае.

Можно показать, что с помощью удобной величины – подвижности иона U закон Ома (с учетом роли положительных и отрицательных ионов) принимает вид $\vec{j} = n_0 q (U_+ + U_-) \vec{E}$.

Подвижность иона – это направленная скорость иона в единичном поле, т.е. $U = \frac{V}{E}$.

Для данного газа и при заданных физических условиях $U = \text{const}$. Сравнивая с законом Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, видим, что удельная проводимость газа $\sigma = n_0 q (U_+ + U_-)$.

Второй частный случай $\frac{j}{qd} \gg \gamma n_0^2$ – реализация при достаточно сильном поле \vec{E} . Мы теперь имеем $\Delta n_H = \frac{j}{qd}$, т.е. все создаваемые ионизатором ионы участвуют в токе, поэтому такой ток называется током насыщения. Для плотности тока насыщения $j = j_{нас}$ получаем соотношение $j_{нас} = qd \Delta n_u$.

Найденные результаты показаны на рис. 10.

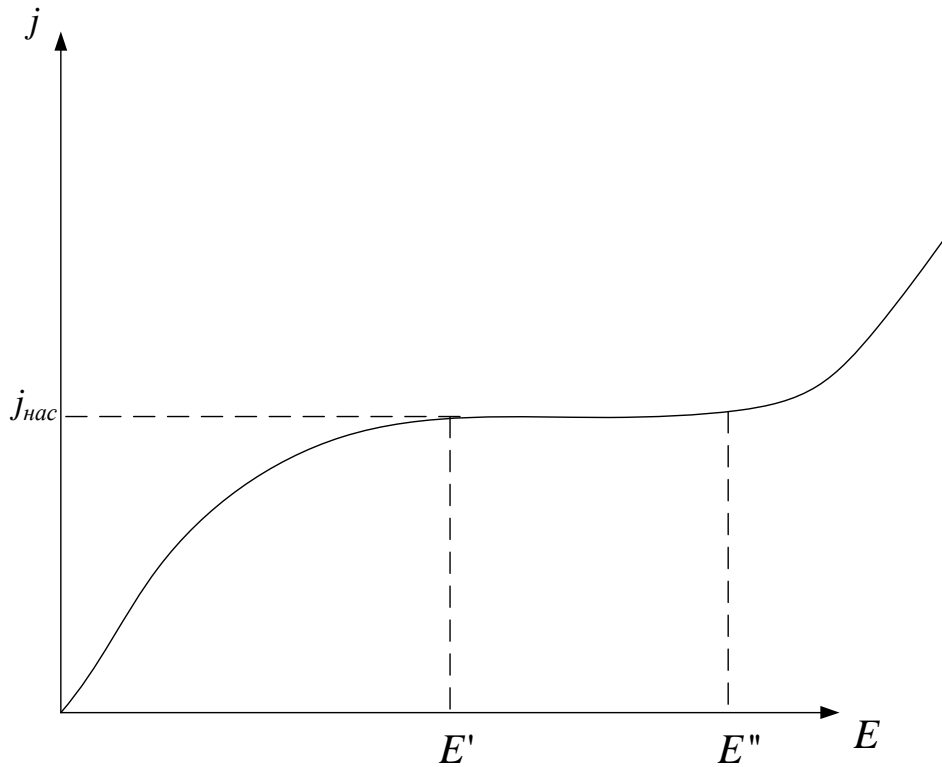


Рис. 10. Зависимость плотности тока газового разряда от напряженности электрического поля: 1 – ток при несамостоятельном разряде; 2 – ток насыщения; 3 – ток при самостоятельном разряде

При значениях поля $E < E'$ выполняется закон Ома. В области значений поля $E' < E < E''$ $j = j_{нас}$.

При $E > E''$ ток резко возрастает. Это происходит потому, что электрон успевает на длине свободного пробега приобрести за счет работы поля \vec{E} кинетическую энергию, достаточную для ионизации встречной молекулы газа (ионизация ударом).

Новые электроны, возникающие вследствие ионизации, после разгона в поле \vec{E} будут также способны ионизировать встречные молекулы газа. Это приводит к тому, что по мере приближения к аноду количество носителей заряда будет лавинообразно возрастать. Но для прохода несамостоятельной проводимости в самостоятельную необходимо, чтобы электронные лавины сами себя поддерживали. Это станет возможным, если в газе взамен ушедших на анод электронов будут непрерывно появляться новые (вторичные) электроны, играющие роль «запала». При выполнении указанных условий внешний ионизатор будет не нужен. Напряжение, соответствующее переходу из несамостоятельной проводимости в самостоятельную, называется напряжением зажигания.

2.2. Виды самостоятельной проводимости

2.2.1. Тлеющий разряд

Тлеющий разряд наблюдается в газах при низких давлениях – порядка нескольких десятков миллиметров ртутного столба и меньше. Если рассмотреть трубку с тлеющим разрядом, то можно увидеть, что основными частями тлеющего разряда являются *катодное темное пространство*, резко отдаленное от него *отрицательное*, или *тлеющее свечение*, которое постепенно переходит в область *фарадеева темного пространства*. Эти три области образуют катодную часть разряда, за которой следует основная светящаяся часть разряда, определяющая его оптические свойства и называемая *положительным столбом*.

Основную роль в поддержании тлеющего разряда играют первые две области его катодной части. Характерной особенностью этого типа разряда является резкое падение потенциала вблизи катода, которое связано с большой концентрацией положительных ионов на границе I и II областей, обусловленной сравнительно малой скоростью движения ионов у катода. В катодном темном пространстве происходит сильное ускорение электронов и положительных ионов, выбивающих электроны из катода. В области тлеющего свечения электроны производят интенсивную ударную ионизацию молекул газа и теряют свою энергию. Здесь образуются положительные ионы, необходимые для поддержания разряда. Напряженность электрического поля в этой области мала. Тлеющее свечение в основном вызывается рекомбинацией ионов и электронов. Протяженность катодного темного пространства определяется свойствами газа и материала катода.

В области положительного столба концентрация электронов и ионов приблизительно одинакова и очень велика, что обуславливает большую электропроводность положительного столба и незначительное падение в нем потенциала. Свечение положительного столба определяется свечением возбужденных молекул газа. Вблизи анода вновь наблюдается сравнительно резкое изменение потенциала, связанное с процессом генерации положительных ионов. В ряде случаев положительный столб распадается на отдельные светящиеся участки – *страты*, разделенные темными промежутками.

Положительный столб не играет существенной роли в поддержании тлеющего разряда, поэтому при уменьшении расстояния между электродами трубки длина положительного столба сокращается и он может исчезнуть совсем. Иначе обстоит дело с длиной катодного темного простран-

ва, которая при сближении электродов не изменяется. Если электроды сблизились настолько, что расстояние между ними станет меньше длины катодного темного пространства, то тлеющий разряд в газе прекратится. Опыты показывают, что при прочих равных условиях длина d катодного темного пространства обратно пропорциональна давлению газа. Следовательно, при достаточно низких давлениях электроны, выбиваемые из катода положительными ионами, проходят через газ почти без столкновений с его молекулами, образуя *электронные*, или *катодные лучи*.

Тлеющий разряд используется в газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизаторах напряжения, для получения электронных и ионных пучков. Если в катоде сделать щель, то сквозь нее в пространство за катодом проходят узкие ионные пучки, часто называемые *канальными лучами*. Широко используется явление *катодного распыления*, то есть разрушение поверхности катода под действием ударяющихся о него положительных ионов. Ультрамикроскопические осколки материала катода летят во все стороны по прямым линиям и покрывают тонким слоем поверхность тел (особенно диэлектриков), помещенных в трубку. Таким способом изготавливают зеркала для ряда приборов, наносят тонкий слой металла на селеновые фотоэлементы.

2.2.2. Коронный разряд

Коронный разряд возникает при нормальном давлении в газе, находящемся в сильно неоднородном электрическом поле (например, около остриев или проводов линий электропередачи высокого напряжения). При коронном разряде ионизация газа и его свечение происходят лишь вблизи коронирующих электродов. В случае коронирования катода (отрицательная корона) электроны, вызывающие ударную ионизацию молекул газа, выбиваются из катода при бомбардировке его положительными ионами. Если коронирует анод (положительная корона), то рождение электронов происходит вследствие фотоионизации газа вблизи анода. Корона – вредное явление, сопровождающееся утечкой тока и потерей электрической энергии. Для уменьшения коронирования увеличивают радиус кривизны проводников, а их поверхность делают возможно более гладкой. При достаточно высоком напряжении между электродами коронный разряд переходит в искровой.

При повышенном напряжении коронный разряд на острие приобретает вид исходящих из острия и перемежающихся во времени светлых линий. Эти линии, имеющие ряд изломов и изгибов, образуют подобие кисти, вследствие чего такой разряд называют **кистевым**.

Заряженное грозовое облако индуцирует на поверхности Земли под собой электрические заряды противоположного знака. Особенно большой заряд скапливается на остриях. Поэтому перед грозой или во время грозы нередко на остриях и острых углах высоко поднятых предметов вспыхивают похожие на кисточки конусы света. С давних времен это свечение называют огнями святого Эльма.

Особенно часто свидетелями этого явления становятся альпинисты. Иногда не только металлические предметы, но и кончики волос на голове украшаются маленькими светящимися кисточками.

С коронным разрядом приходится считаться, имея дело с высоким напряжением. При наличии выступающих частей или очень тонких проводов может начаться коронный разряд. Это приводит к утечке электроэнергии. Чем выше напряжение высоковольтной линии, тем толще должны быть провода.

2.2.3. Искровой разряд

Пусть в атмосферном воздухе имеются два холодных плоских электрода. Будем постоянно увеличивать напряжения между ними. При напряженности поля, большей пробивного значения, возникает искровой разряд. Он имеет вид ярких зигзагообразных разветвляющихся нитей-каналов, которые пронизывают разрядный промежуток и исчезают, сменяясь новыми. Исследования показали, что каналы искрового разряда начинают расти иногда от положительного электрода, иногда от отрицательного, а иногда и от какой-нибудь точки между электродами. Это объясняется тем, что ионизация ударом в случае искрового разряда происходит не по всему объему газа, а по отдельным каналам, проходящим в тех местах, в которых концентрация ионов случайно оказалась наибольшей. Искровой разряд сопровождается выделением большого количества теплоты, ярким свечением газа, треском или громом. Все эти явления вызываются электронными и ионными лавинами, которые возникают в искровых каналах и приводят к огромному увеличению давления, достигающему $10^7 - 10^8$ Па, и повышению температуры до 10000 °С.

Прерывистый характер искры объясняется тем, что она обладает малым сопротивлением, то есть «закорачивает» электроды. Поэтому напряжение между электродами падает. Это приводит к исчезновению искры. Далее процесс повторяется.

Характерным примером искрового разряда является молния. Главный канал молнии имеет диаметр от 10 до 25 см, а длина молнии может

достигать нескольких километров. Максимальная сила тока импульса молнии достигает десятков и сотен тысяч ампер.

При малой длине разрядного промежутка искровой разряд вызывает специфическое разрушение анода, называемое *эрозией*. Это явление было использовано в электроискровом методе резки, сверления и других видах точной обработки металла.

Искровой промежуток применяется в качестве предохранителя от перенапряжения в электрических линиях передач (например, в телефонных линиях). Если вблизи линии проходит сильный кратковременный ток, то в проводах этой линии индуцируются напряжения и токи, которые могут разрушить электрическую установку и опасны для жизни людей. Во избежание этого используются специальные предохранители, состоящие из двух изогнутых электродов, один из которых присоединен к линии, а другой заземлен. Если потенциал линии относительно земли сильно возрастает, то между электродами возникает искровой разряд, который вместе с нагретым им воздухом поднимается вверх, удлиняется и обрывается.

Наконец, электрическая искра применяется для измерения больших разностей потенциалов с помощью *шарового разрядника*, электродами которого служат два металлических шара с полированной поверхностью. Шары раздвигают, и на них подается измеряемая разность потенциалов. Затем шары сближают до тех пор, пока между ними не проскочит искра. Зная диаметр шаров, расстояние между ними, давление, температуру и влажность воздуха, находят разность потенциалов между шарами по специальным таблицам. Этим методом можно измерять с точностью до нескольких процентов разности потенциалов порядка десятков тысяч вольт.

Искровой разряд используется также для воспламенения горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания (искровые разрядники). Его используют для регистрации заряженных частиц (искровые счетчики) и т.д.

2.2.4. Дуговой разряд

Дуговой разряд возможен при низком (порядка нескольких Па) и высоком (до 10^8 Па) давлении. Плотность тока в дуге может достигать $10^5 - 10^6$ А/мм² при небольшом напряжении между электродами.

При горении дуги температура межэлектродной плазмы при атмосферном давлении достигает 6000 К, а с повышением давления возрастает еще больше.

Температура катода достигает 3000 К, анод, бомбардируемый потоком электронов, разогревается еще сильнее, поэтому материал анода интенсивно испаряется.

Основными процессами, поддерживающими дуговой разряд, являются термоэлектронная эмиссия с раскаленной поверхности катода и термическая ионизация молекул газа.

Рассмотрим два вида дугового разряда. Первый вид – дуговой разряд, в котором источником вторичных электронов является термоэлектронная эмиссия с горячего катода. При ускорении вылетающие из катода электроны становятся способными ионизировать встречные молекулы. Самое яркое место дуги – это углубление на поверхности анода (кратер). Рассматриваемый вид дугового разряда характеризуется большой плотностью тока и сравнительно небольшим напряжением между электродами. Второй вид – это дуги с холодными электродами (например, разряд в ртутной лампе, в которой столбики жидкой ртути служат электродами). В таких дугах вторичные электроды появляются за счет автоэлектронной эмиссии из катода.

Электрическая дуга была открыта в 1803 г. Петровым и 1876 г. применена Яблочковым для уличного освещения. Дуговая лампа сверхвысокого давления является мощным источником света.

Дуговой разряд находит широкое применение в народном хозяйстве для сварки и резки металлов, получения высококачественных сталей (дуговая печь) и освещения (прожекторы, проекционная аппаратура), для выпрямления переменного тока (в ртутных выпрямителях), в медицине (кварцевые лампы) и т.д.

3. Плазма

В известной нам части Вселенной плазма – это основное состояние вещества. Солнце, звезды, ионосфера, радиационные пояса Земли – примеры плазменных образований. Во всех рассматриваемых видах газового разряда имеются участки, заполненные плазмой (газоразрядная плазма).

В последние годы физика плазмы служит научной основой для решения различных технических проблем, из которых важнейшие – это управляемый термоядерный синтез и магнитогидродинамические преобразователи тепловой энергии в электрическую.

Что же такое плазма? Плазмой называется сильно ионизированный газ, в котором концентрация положительных и отрицательных зарядов практически одинакова. Различают высокотемпературную плазму, возникающую при сверхвысоких температурах, и газоразрядную плазму, возникающую при газовом разряде.

Заряженные частицы (электроны, ионы) газоразрядной плазмы, находясь в ускоряющем электрическом поле, обладают различной средней кинетической энергией. Это означает, что температура T_e электронного га-

за одна, а ионного T_u – другая, причем $T_e > T_u$. Несоответствие этих температур указывает на то, что газоразрядная плазма является неравновесной. Прекращение действия электрического поля приводит к исчезновению газоразрядной плазмы.

Высокотемпературная плазма является равновесной или изотермической, т.е. при определенной температуре убыль числа заряженных частиц восполняется в результате термической ионизации.

В такой плазме соблюдается равенство средних кинетических энергий, составляющих плазму различных частиц.

Условием существования плазмы является некоторая минимальная плотность заряженных частиц, начиная с которой можно говорить о плазме как таковой. Эта плотность определяется в физике плазмы из неравенства $L \gg D$, где L – линейный размер системы заряженных частиц; D – так называемый дебаевский радиус экранирования, представляющий собой то расстояние, на котором происходит экранирование кулоновского поля любого заряда плазмы.

Плазма обладает следующими основными свойствами: высокой степенью ионизации газа, равенством нулю результирующего пространственного заряда, большой электропроводимостью, сильным взаимодействием с электрическим и магнитным полями, колебаниями электронов в плазме с большей частотой ($\approx 10^8$ Гц), вызывающими общее вибрационное состояние плазмы, «коллективным» (одновременным) взаимодействием громадного числа частиц. Эти свойства определяют качественное своеобразие плазмы, позволяющее считать ее особым, четвертым состоянием вещества.

Чтобы перевести газ в состояние плазмы, нужно оторвать хотя бы часть электронов от атомов, превратив эти атомы в ионы. Такой отрыв от атомов называют ионизацией. В природе и технике ионизация может производиться различными путями. Самые распространенные из них:

- ионизация тепловой энергией;
- ионизация электрическим разрядом;
- ионизация давлением;
- ионизация лазерным излучением.

Наиболее широко плазма применяется в светотехнике – в газоразрядных лампах, освещающих улицы, в люминесцентных лампах. Всякий, кто имел «удовольствие» устроить в электрической сети короткое замыкание, встречался с плазмой. Искра, которая проскакивает между проводами, состоит из плазмы электрического разряда в воздухе. Дуга электрической сварки – тоже плазма. Любое вещество, нагретое до достаточно высокой температуры, переходит в состояние плазмы. Легче всего это происходит с

парами щелочных металлов, таких, как натрий, калий, цезий. Обычное пламя обладает некоторой теплопроводностью; оно, хотя и в слабой степени, ионизировано, то есть является плазмой. Причина этой проводимости – ничтожная примесь натрия, который можно распознать по желтому свечению. Для полной ионизации газа нужна температура в десятки тысяч градусов. Кроме того, плазма применяется в самых разных газоразрядных приборах – выпрямителях электрического тока, стабилизаторах напряжения, плазменных усилителях и генераторах сверхвысоких частот (СВЧ), счетчиках космических частиц. Все так называемые газовые лазеры (гелий-неоновый, криптоновый, на диоксиде углерода и т.п.) на самом деле плазменные – газовые смеси в них ионизованы электрическим разрядом. Свойствами, характерными для плазмы, обладают электроны проводимости в металле (ионы, жестко закрепленные в кристаллической решетке, нейтрализуют их заряды), совокупность свободных электронов и подвижных «дырок» (вакансий) в полупроводниках. Поэтому такие системы называют *плазмой твердых тел*. *Газовую плазму* принято разделять на *низкотемпературную* – до 100 тыс. градусов и *высокотемпературную* – до 100 млн градусов. Существуют генераторы низкотемпературной плазмы – плазмотроны, в которых используется электрическая дуга. С помощью плазмотрона можно нагреть почти любой газ до 7000 – 10000 градусов за сотые и тысячные доли секунды. С созданием плазмотрона возникла новая область науки – плазменная химия (многие химические реакции ускоряются или идут только в плазменной струе). Плазмотроны применяются и в горнорудной промышленности, и для резки металлов. Созданы также плазменные двигатели, магнетогидродинамические электростанции. Разрабатываются различные схемы плазменного ускорения заряженных частиц. Центральной задачей физики плазмы является проблема управляемого термоядерного синтеза. Термоядерными называют реакции синтеза более тяжелых ядер из ядер легких элементов (в первую очередь – изотопов водорода – дейтерия D и трития T), протекающие при очень высоких температурах. В естественных условиях термоядерные реакции происходят на Солнце – ядра водорода соединяются друг с другом, образуя ядра гелия, при этом выделяется значительное количество энергии. Искусственная реакция термоядерного синтеза была осуществлена в водородной бомбе.

Известны случаи, когда приходится учитывать плазму как явление, которого нужно избегать. Это возникновение плазменной дуги при коммутационных и переходных процессах. Например, при отключении линии электропередачи в выключателе между контактами возникает дуга, которая должна быть погашена как можно быстрее.

Литература

1. Адирович, Э.И. Электрический ток / Э.И. Адирович. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952.
2. Арцимович, Л.А. Элементарная физика плазмы / Л.А. Арцимович. – М.: Атомиздат, 1966.
3. Браун, С. Элементарные процессы в плазме газового разряда: пер с англ. / С. Браун. – М.: Наука, 1991.
4. Белов, Д. В. Краткий курс общей физики. Электричество и магнетизм / Д.В. Белов. – М.: Изд-во МГУ, 1981.
5. Вурзель, Ф.Б. Плазмохимия / Ф.Б. Вурзель, Л.С. Полак. – М.: Знание, 1985.
6. Грановский, В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский; под ред. Л.А. Сена и В.Е. Голаната. – М.: Наука, 1981.
7. Давыденко, В.И. Экспериментальные методы диагностики плазмы: лекции для студентов физического факультета. Ч. 1 / В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен. – Новосибирск: НГУ, 1999.
8. Капцов, Н.А. Электроника. – 2-е изд. / Н.А. Капцов. – М.: Наука, 1996.
9. Карпенков, С.Х. Концепции современного естествознания / С.Х. Карпенков. – М.: Академический проект, 2004.
10. Кесаев, И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М., 1968.
11. Макаренко, Г.М. Курс общей физики / Г.М. Макаренко. – Минск: ДизайнПРО, 2003.
12. Райзер, Ю.П. Лазерная искра и распределение разрядов / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1994
13. Физика и техника низкотемпературной плазмы / под ред. С.В. Дресвина. – М.: ВИТИ, 2002.
14. Фортов, В.Е. Физика неидеальной плазмы. – 2-е изд. / В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, И.Т. Якубов. – М.: Физмат, 2010.
15. Финкельнбург, В. Электрические дуги и термическая плазма: пер. с нем. / В. Финкельнбург, Г. Меккер. – М.: Прогресс, 1991.
16. Энгель, А. Ионизированные газы: пер с англ. / А. Энгель. – М.: Наука, 1989.
17. Энгель, А. Физика и техника электрического разряда в газах: пер. с нем. Т. 1, 2 / А. Энгель, М Штенбек. – М.: Наука, 1996.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Эмиссионные явления и их изменение	3
1.1. Термоэлектронная эмиссия	3
1.2. Фотоэлектронная эмиссия	6
1.3. Вторичная электронная эмиссия.....	7
1.4. Автоэлектронная эмиссия	12
2. Электропроводность газов	13
2.1. Закон Ома при несамостоятельной проводимости газов.....	15
2.2. Виды самостоятельной проводимости	19
2.2.1. Тлеющий разряд	19
2.2.2. Коронный разряд.....	20
2.2.3. Искровой разряд.....	21
2.2.4. Дуговой разряд	22
3. Плазма.....	23
Литература	26

Учебное издание

МАКАРЕНКО Геннадий Макарович
БРИНКЕВИЧ Ксения Леонидовна

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ:
В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ**

Учебно-методическое пособие для студентов
технических специальностей

Редактор *Т. В. Булах*

Подписано в печать 26.12.2012. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 3,71. Уч.-изд. л. 2,8. Тираж 30 экз. Заказ 1888.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.