

ИОНИЗАЦИЯ УДАРАМИ ВТОРОГО РОДА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ

А. А. Зайцев и Э. М. Рейхрудель, Москва

1. Введение

Среди элементарных процессов, происходящих при электрическом разряде в газе, наряду с возбуждением при электронном ударе могут иметь место также обратные эффекты. Последние идут примерно по схеме:

возбужденная молекула + электрон $\rightleftharpoons$ нормальная молекула + электрон с кинетической энергией.

При этих ударах энергия возбуждения молекулы переходит в кинетическую энергию электрона. Такие соударения по Клейну и Росселанду¹ названы ударами второго рода в отличие от ударов первого рода, при которых, наоборот, кинетическая энергия электрона при соударениях его с молекулой (атомом) газа переходит в энергию возбуждения молекулы (атома).

Впоследствии термин „удар второго рода“ стали применять для обозначения всех явлений, при которых энергия возбуждения переходит от одного атома к другому или же превращается в кинетическую энергию одной или обеих соударяющихся частиц.

Впервые еще в 1912 г. Вуд² экспериментально наблюдал „тушение“ резонансного излучения ртутной трубки при введении в нее примеси воздуха. Вуд тогда же объяснил это явление соударениями молекул воздуха с атомами ртути. Франк и Карно³ предложили изящный метод и впервые экспериментально установили существование ударов второго рода. В их опытах освещалась ртутной дугой смесь из паров ртути и таллия (или кадмия). В результате поглощения ртутных линий в смеси наблюдалась так называемая сенсibilизированная флуоресценция. Оптически возбуждалась только ртуть, но в спектре флуоресценции обнаруживались также линии таллия (или кадмия), что происходило, вероятно, в результате соударений второго рода между атомами таллия и возбужденными атомами ртути.

Гольст и Остеруис⁴ наблюдали образование дуги в неоне при разности потенциалов в 7,5 V, и в аргоне при 3,5 V, в то время как наименьшие критические потенциалы этих газов равны 16,7 и 11,5 V, соответственно. Для объяснения этого явления низковольтной дуги Гольст и Остеруис привлекли удары второго рода.

При этом речь шла не о возбужденных атомах, а об ионах, которые при рекомбинации с другими ионами освобождают свою энергию нейтрализации. Однако в низковольтной дуге, как это следует из работ Комптона и Экарта⁵, эффект рекомбинации ионов играет, повидимому, лишь второстепенную роль и само существование дуги в неоне и аргоне, при наблюдаемых Гольстом и Остеруисом условиях, может быть только отчасти объяснено ударами второго рода.

В 1926 г. Франк и Иордан⁶ указали, что рассеяние электронов в сильно ионизированных газах, наблюдаемое в работах Лэнгмюра⁷, можно объяснить ударами второго рода. Но после того как Пеннинг⁸, а затем Лэнгмюр и Тонкс⁹ наблюдали колебания с очень короткой длиной волны (около 50 см) в разрядах этого рода, стало более вероятным, что причиной аномального рассеяния электронов являются эти колебания.

Штрауф¹⁰ наблюдал в объеме, в котором вследствие окисления фосфора имелись возбужденные молекулы, электроны со скоростями, превышавшими скорости, которые могли быть вызваны наложенной разностью потенциалов. Автор объяснил появление этих электронов ударами второго рода. Более чистые опыты, произведенные Латышевым¹¹, подтвердили эту точку зрения.

Параллельно с этими работами проводилось также изучение соударений второго рода между возбужденными атомами основного газа и атомами примеси в разрядной трубке.

Обыкновенные возбужденные атомы имеют очень малую продолжительность жизни ($\sim 10^{-8}$ сек.), и, вообще говоря, при малых токах вероятность их встречи с электроном или атомом примеси невелика. Но существуют такие возбужденные состояния, из которых атом не может перейти в нормальное состояние путем спонтанного излучения. Это так называемые метастабильные состояния, продолжительность жизни которых во много раз больше (10^{-4} — 10^{-1} сек.), чем у обыкновенных возбужденных состояний. Присутствие метастабильных атомов сильно увеличивает вероятность соударения второго рода, сказываясь особенно заметно при малых токах.

Работами ряда исследователей¹² установлено, что метастабильные атомы могут легко перейти в нормальное состояние в результате их соударений с атомами некоторых примесей. Этот процесс значительно более вероятен, чем переход при соударениях с атомами основного газа. При этом потенциальная энергия метастабильного атома переходит в энергию соударяющегося с ним атома примеси; последний, таким образом, может ионизироваться или перейти в возбужденное состояние с малой продолжительностью жизни, из которого атом, излучая, переходит в нормальное состояние. Химические и оптические явления, имеющие место при соударениях второго рода, исследованы в большом числе работ. Полное и критическое рассмотрение этих работ проведено в книге Митчелла и Земанского¹³. В разряде в чистом газе метастабильные атомы могут

уменьшать интенсивность некоторых линий излучения. Например, не возбуждение верхних уровней, являющихся исходными для линий видимого спектра излучения, происходит согласно Дортелю¹⁴ главным образом через посредство метастабильного уровня, т. е. сначала атом возбуждается на метастабильный уровень, а затем происходит переход атома на более высокий нестабильный уровень. Непосредственное возбуждение на верхний нестабильный уровень ограничивается недостатком необходимых для этого электронов с большой энергией.

В разряде в смеси газов метастабильные атомы могут вызвать возбуждение атомов примеси и, следовательно, излучение линий спектра примеси. При этом могут возбуждаться как дуговой, так и искровой спектры. Фрерикс¹⁵ наблюдал возбуждение атомов Mg и Cd в разряде в неоне.

Дуффендак и Смис¹⁶, Дуффендак и Уолер¹⁷ изучали возбуждение спектра молекулярных газов, введенных в качестве примесей в разряд в благородных газах. Из новейших спектральных исследований нужно отметить работу Фриша¹⁸, который наблюдал возбуждение свечения в смеси паров ртути и натрия в разрядной трубке с полым катодом. Наблюдалось значительное увеличение интенсивности линий натрия, потенциал возбуждения которых отличается на 0,02—0,04 V от потенциала возбуждения 3P_0 - и 3P_1 -уровней ртутных атомов. Установлена асимметрия кривой вероятности соударений второго рода между атомами ртути и натрия: соударения второго рода менее вероятны, когда потенциал возбуждения атомов ртути лежит выше потенциала возбуждения атомов натрия. Установлена также роль ударов второго рода при возбуждении свечения смеси паров натрия с парами Mg, Cd и Zn.

Выяснению роли ступенчатого возбуждения в общем процессе возбуждения атомов, использованию наблюдений интенсивности излучения и абсорбции для количественной оценки концентрации возбужденных атомов в разряде в парах металлов в связи с изучением роли ударов второго рода посвящены работы Фабриканта и его сотрудников¹⁹. Некоторые результаты измерения световой экономичности в положительном столбе разряда в неоне при различных условиях, произведенные Клярфальдом и Тарасковым²⁰, по-видимому, находят свое объяснение в роли метастабильных атомов.

В настоящей статье рассматривается, главным образом, влияние метастабильных атомов на электрические параметры газового разряда.

2. ВЛИЯНИЕ СОУДАРЕНИЙ ВТОРОГО РОДА НА ПОТЕНЦИАЛ ЗАЖИГАНИЯ РАЗРЯДА

Присутствие возбужденных, в частности, метастабильных атомов в трубке газового разряда может привести к следующим процессам:

1. Метастабильные атомы облегчают ионизацию при электронном ударе в объеме газа, так как для ионизации возбужденного атома требуется меньше энергии, чем для ионизации нормального. Таким образом присутствие метастабильных атомов ведет к увеличению степени ионизации газа. Особенно эффективны метастабильные атомы при условии, если в разряде имеется примесь другого газа с потенциалом ионизации меньшим, чем потенциал возбуждения метастабильного уровня основного газа. Тогда энергия возбуждения метастабильного атома основного газа достаточна для ионизации атома примеси. Полученные таким путем новые ионы и электроны, ускоряясь электрическим полем, участвуют в лавинообразном процессе ионизации (объемный эффект).

2. Метастабильные атомы могут также употребить свою энергию возбуждения на освобождение электронов из поверхности электродов, с которыми они приходят в соприкосновение (поверхностный эффект). Для такой эмиссии необходимо лишь, чтобы потенциал возбуждения метастабильного атома был достаточен для освобождения электронов из поверхности металла.

Чаше всего поверхностный эффект комбинируется с объемным. Пеннинг²¹ и другие установили, что потенциал зажигания в аргоне и неоне понижается, если примешать к ним малые дозы газов, имеющих потенциал ионизации V_i более низкий, чем потенциал возбуждения метастабильного уровня $V_{мет}$ основного газа, т. е. $V_{мет} > V_i$; процесс можно представить себе так:

метастабильный атом основного газа + атом примеси $\rightleftharpoons$ нормальный атом основного газа + ион примеси + электрон.

Некоторые данные из первой работы Пеннинга приведены в табл. 1. Измерения проводились в разрядной цилиндрической трубке с плоскими электродами при различных давлениях основного газа и при различной дозе примеси.

ТАБЛИЦА 1

Pd мм·см	Неон $V_{мет} = 16,5 \text{ V}$ и $16,6 \text{ V}$			
	$V_z \text{ (V)}$	$V'_z \text{ (V)}$	% примеси	$V_i \text{ (V)}$
22	400	200	0,001	10,4
22	400	150	0,05	10,4
81	750	180	0,006	15,4
15	320	160	0,03	15,4

Здесь Pd — произведение из давления газа, выраженного в миллиметрах ртутного столба, и расстояния d между электродами (в сантиметрах), V_z — потенциал зажигания разряда в чистом неоне, V'_z — потенциал зажигания разряда в неоне с примесью, V_i — потенциал ионизации примеси.

Из табл. 1 видно, какого значительного снижения потенциала зажигания можно достигнуть за счет примеси. Например, если к неону, потенциалы возбуждения метастабильных атомов которого равны 16,5 и 16,6 В, примешать 0,05% паров ртути (потенциал ионизации равен 10,4 В), то потенциал зажигания снижается при прочих равных условиях с 400 до 150 В. Аналогичное снижение получается в аргоне с примесью ртути.

Из рис. 1 видно, что понижение потенциала зажигания зависит от давления основного газа и от процента примеси.

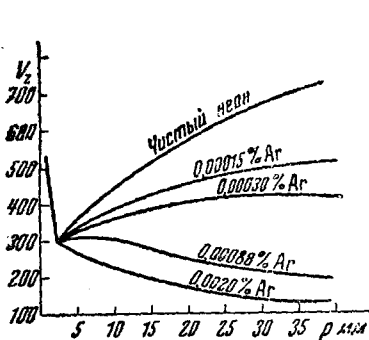


Рис. 1.

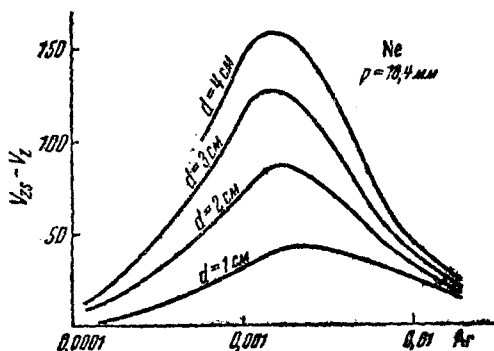


Рис. 2.

Пеннинг объяснил наблюдаемое явление действиями метастабильных атомов. Пока основной газ, в котором имеются нейтральные метастабильные атомы, чист, пробоя разрядного промежутка не происходит, но если в газе имеется примесь, атомы которой могут быть ионизированы энергией метастабильных атомов основного газа, то разряд может наступить уже при более слабом электрическом поле.

Приведенные на рис. 2 кривые показывают, в каких условиях эффект понижения потенциала зажигания в неоне увеличивается и является наибольшим. Кривые имеют максимум, когда примесь аргона к основному газу составляет несколько тысячных процента. Ход кривой легко объяснить именно соударениями второго рода.

Если процентное содержание примеси мало, то и уменьшение потенциала зажигания незначительно, так как вероятность соударения метастабильного атома с атомом примеси в этих условиях мала. С ростом содержания примеси эффект нарастает. При дальнейшем росте процента примеси все более заметными становятся потери энергии электронов (упругие и неупругие) при соударении их с атомами примеси. Это обстоятельство при рассматриваемых случаях смесей, когда атомы примеси имеют меньший потенциал ионизации, чем основной газ, вызывает уменьшение вероятности возбуждения метастабильных атомов. Следствием этого является уменьшение эффекта изменения потенциала зажигания при больших примесях. Эффект изменения потенциала зажигания при прибавле-

нии к основному газу различных примесей, наблюдаемый Клярфельдом²², во многих случаях находится в связи с ударами второго рода.

При изучении действия возбужденных атомов необходимо иметь возможность произвольно менять концентрацию их. Установить абсолютную концентрацию метастабильных атомов весьма затруднительно. Во многих случаях пользу приносит знание хотя бы относительной концентрации метастабильных атомов в разряде. Одним из методов для произвольного изменения концентрации метастабильных атомов является освещение разряда извне соответствующим излучением. Поглощая квант излучения, метастабильный атом может перейти на один из соседних обыкновенных возбужденных уровней, откуда возможен спонтанный переход в нормальное состояние путем излучения. В результате этого происходит уменьшение продолжительности жизни метастабильных атомов и, следовательно, и концентрации их. Удобство метода заключается в том, что условия наполнения разрядной трубки при этом сохраняются.

Этим методом впервые воспользовался Пеннинг²¹ при изучении влияния метастабильных атомов на потенциал зажигания разряда.

3. МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ АТОМЫ В СТАЦИОНАРНОМ РАЗРЯДЕ

Пашен впервые указал метод для обнаружения присутствия метастабильных атомов; для этого используется сильное поглощение резонансного излучения газом, в котором имеются атомы в метастабильном состоянии.

Этот метод абсорбции света возбужденным газом является в настоящее время наиболее распространенным для целей измерения продолжительности жизни метастабильных атомов. Земанским²³ дана формула для теоретического вычисления продолжительности жизни. По этой формуле

$$\frac{1}{t} = \frac{B}{p} + Cp,$$

где p — давление газа, B и C — константы, характерные для данного газа и температуры; коэффициент B зависит также от конфигурации трубки. Результаты экспериментов различных авторов^{24,25} дают удовлетворительное согласие с формулой для t , данной Земанским. Зная продолжительность жизни метастабильных атомов, можно сделать некоторые заключения об их концентрации, для этого нужно знать количество вновь возникающих в единицу времени в единице объема метастабильных атомов. Для концентрации N метастабильных атомов справедливо соотношение $N = qt$, где q — число метастабильных атомов, возникающих в единице объема в 1 сек., t — средняя продолжительность их жизни.

Если бы были известны функции возбуждения, то из них можно было бы получить непосредственное возбуждение атомов уда-

рами электронов, а отсюда определить величину q . Копферман и Ладенбург²⁶, Леви²⁷, Шен²⁸ изучали зависимость концентрации возбужденных атомов от силы тока методом аномальной дисперсии. Авторы нашли при этом, что концентрация метастабильных атомов в разряде в использованных ими благородных газах растет при малых плотностях тока пропорционально величине тока. С некоторого значения тока рост концентрации замедляется, и при 100 мА (в неоне) и 50 мА (в аргоне) наступает насыщение концентрации. Наступление насыщения объясняется авторами тем, что при больших токах в разрушении метастабильных атомов начинают существенную роль играть соударения их с электронами. Состояние насыщения связано, по Копферману и Ладенбургу, с наступлением термодинамического равновесия между возбужденными атомами и электронами. При этом формула Больцмана позволяет вычислять электронную температуру, которая в данном случае считается совпадающей со „специфической температурой“ распределения. В недавно появившейся статье Фабрикант и Паневкин²⁹ указывают на то, что насыщение концентраций возбужденных атомов, наблюдаемое Копферманом и Ладенбургом и др., не может быть объяснено наступлением равновесия между ударами первого и второго рода. Основной причиной насыщения концентраций возбужденных атомов, по Фабриканту и Паневкину, надо признать падение электронной температуры с током. Совершенно очевидно, что падение температуры электронов с током, имеющее своим следствием уменьшение числа вновь возникающих в единицу времени метастабильных атомов, а следовательно, и уменьшение — при постоянной продолжительности жизни — концентрации их должно быть привлечено к объяснению явления насыщения.

Пренебрегать ролью ионизации метастабильных атомов электронами вряд ли, однако, можно. Само падение температуры электронов с ростом тока при малых плотностях тока находит свое объяснение в ступенчатой ионизации. Но сказать более определенно о соотношении двух факторов (уменьшение температуры и разрушение метастабильных атомов) в эффекте насыщения довольно трудно, ибо количественные соображения, которые здесь могут быть приведены, носят грубо приближенный характер.

а) Эффекты в плазме разряда. Изучение влияния метастабильных атомов при стационарном разряде в инертных газах проводилось, начиная с 1928 г. Ряд исследователей нашел, что токи к отрицательно заряженному зонду в положительном столбе разряда в неоне больше, чем ожидается по теории зондов.

Теория зондов, созданная трудами Лэнгмюра и Мотт-Смита³⁰, позволяет по вольтамперным характеристикам зондов определить основные параметры плазмы газового разряда. Методом зондов удается измерить потенциал пространства, концентрацию и среднюю энергию (температуру) электронов в положительном столбе разряда. Особенно хорошо теория оправдывается в широком интервале потенциалов зонда для разряда в парах ртути. Именно

виду большой теоретической и практической плодотворности метода зондов было целесообразно экспериментально исследовать отклонения от этой теории.

Впервые измерения Морзе и Ютерховен³¹ показали, что ток к зонду в неоне при отрицательном потенциале около 150 В относительно окружающего пространства в два раза больше вычисленного, исходя из потенциала зонда и толщины слоя, окружающего его. Одной из вероятных причин авторы считали ионизацию метастабильными атомами в слое, окружающем зонд, поступающим из разряда излучением. Результаты работы Ютерховена и Гаррингтона³² показывают, что при низких давлениях неона 15—50% тока к отрицательному зонду возникают благодаря вторичной эмиссии электронов, большая часть которой обусловлена незаряженными частицами, вероятно, метастабильными атомами.

Олифант³³ также считает, что во вторичной эмиссии электронов под действием нейтральных частиц, которую он наблюдал при разряде в гелии, принимают участие метастабильные атомы гелия. Исследования Лэнгмюра и Фоунда³⁴ и Сливака и Рейхруделя³⁵ в разряде и неоне при давлениях 0,5—2 мм Hg показали, что электронный ток с отрицательно заряженного зонда существует не только при нахождении зонда в плазме разряда, но и тогда, когда зонд расположен далеко за пределами плазмы. Опыты показывают, что токи эти много больше (в сотни раз), чем ожидалось из соотношения, полученного Лэнгмюром и Комптоном на основе теории диффузии Шоттки. Они находятся в связи с концентрацией метастабильных атомов вблизи зонда, но не могли быть объяснены вторичной эмиссией электронов, производимой ионами или метастабильными атомами, непосредственно диффундирующими из плазмы, так как свободный пробег этих частиц в условиях опыта был слишком мал.

Возникновение метастабильных атомов вблизи поверхности зонда могло иметь причиной резонансное излучение короткой длины волны, диффундирующее из разряда и возбуждающее атомы газа. Однако резонансное излучение поглощается и вновь эмитируется атомами газа миллионы раз прежде, чем достигнет стенок или зонда. Коэффициент поглощения газа α_0 для резонансного излучения по классической теории Ладенбурга³⁶ дается выражением

$$\alpha_0 = \frac{N e^2}{v_0 m v},$$

где N — число атомов в единице объема в нормальном состоянии, v_0 — частота резонансного излучения, v — средняя скорость газовых атомов, m — заряд и масса электрона. Подставляя числовые значения этих величин для неона при давлении $p = 1$ мм Hg, получим $\alpha_0 = 1,55 \cdot 10^6$, или „свободный пробег“ резонансного излучения при этих условиях равен $6,45 \cdot 10^{-6}$ см.

Вследствие короткого среднего свободного пробега резонансного излучения происходит сильное рассеяние энергии его и оно не

может переноситься на большее расстояние, поэтому должно иметь место быстрое уменьшение плотности электронов, положительных ионов и метастабильных атомов с расстоянием от источника. Поэтому для объяснения механизма возникновения метастабильных состояний на далеком расстоянии от разряда Лэнгмюр использует установленные Вудом³⁷ особенности резонансных линий — именно, что эмиссионная линия шире, чем абсорбционная. Коэффициент абсорбции для центра резонансной линии больше, чем для краев.

Излучение краев расширенной резонансной линии может переноситься на большие расстояния. Когда расширенное резонансное излучение, переносимое вдоль трубки, абсорбируется, наконец, то большая часть его реэмитируется в виде узких линий, которые сильно поглощаются. Этот процесс состоит в превращении излучения, имеющего длинный „свободный пробег“, в излучение с коротким свободным пробегом или большим коэффициентом поглощения.

Принимая во внимание, что реэмитированное излучение имеет большой коэффициент поглощения, можно считать, что лишь излучение, реэмитированное вблизи электрода, может попадать на него. Таким образом за счет реэмитированного, сильно поглощаемого резонансного излучения вблизи зонда создаются метастабильные атомы. Последние, встречая стенки и электроды, и могут вызвать вторичную электронную эмиссию с них.

Подсчет, произведенный Лэнгмюром, показывает, что поглощенная в единице объема в 1 сек. энергия, а следовательно, и число образовавшихся метастабильных атомов, убывают обратно третьей степени расстояния от источника излучения (положительного столба). Экспериментальные результаты находятся в согласии с этим выводом. На рис. 3 показаны изменения в зондовых характеристиках за счет метастабильных атомов, полученных в опытах Рейхруделя и Спивака³⁵. Наблюдения производились с подвижными зондами в неоне. Для регулирования концентрации метастабильных атомов авторы пользовались внешним неоновым осветителем. Изменение тока на зонд при освещении, т. е. при уменьшении концентрации метастабильных атомов, происходит как в ионной части характеристики, так и в электронной. Если зонд помещен не в положительном столбе, а за его пределами, токи на зонд уменьшаются при уменьшении концентрации метастабильных атомов в разряде. При высоких отрицательных потенциалах зонда уменьшение тока при

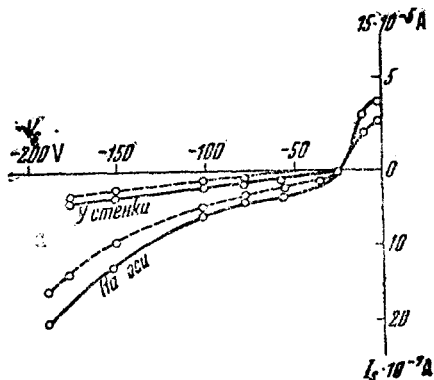


Рис. 3. $p = 1$ мм, $V_A = 260$ В, $I_A = 1,5$ мА

освещении может быть объяснено уменьшением вторичной эмиссии с зонда, вызываемой метастабильными атомами, и последующей таунсендовской лавиной. Различие в изменениях тока при освещении при расположении зонда на оси и у стенки трубки связано с падением концентрации метастабильных атомов у стенки трубки.

Эмиссия электронов с зонда может быть приписана также непосредственному фотоэффекту расширенной резонансной линии. В связи с этим в литературе возникла дискуссия о том, что играет большую роль: метастабильные атомы вблизи зонда или непосредственный фотоэффект. Кенти³⁸ на основании своих опытов с плоским зондом, помещенным вне положительного столба и ориентированным произвольно, параллельно или перпендикулярно к оси разрядной трубки, утверждает, что увеличение тока в случае перпен-

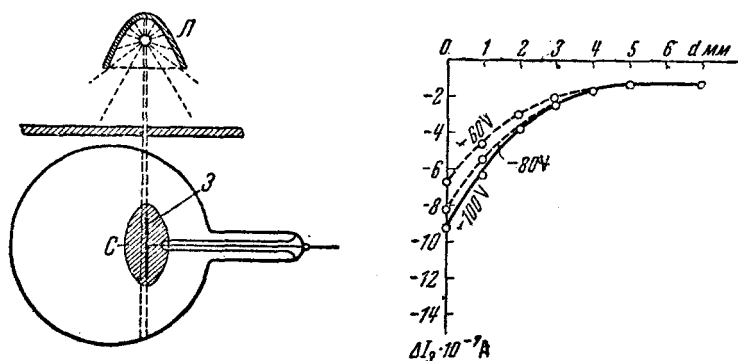


Рис. 4а и б. Расположение опыта. Л — осветительная лампа. С — слой. З — зонд.

Изменение скомпенсированного ионного тока при различных расстояниях пучка света от поверхности зонда.

Зонд в положительном столбе. Разрядный ток $I_A = 4$ мА

дикулярной ориентации зонда является следствием освобождения электронов из поверхности зонда, направленным агентом, именно непосредственным фотоэффектом излучения идущего из столба разряда.

Для отделения эффекта метастабильных атомов в освобождении электронов из поверхности зонда от непосредственного фотоэффекта Рейхрудель и Спивак³⁵ производили также следующие опыты. К отрицательно заряженному зонду, помещенному за пределами столба, приближалась со стороны, противоположной излучению, небольшая стеклянная стенка. Последняя, уничтожая метастабильные атомы вблизи зонда, не меняла существенно направленное излучение из разряда; токи на зонд при приближении к нему сзади стенки уменьшались, что должно быть отнесено, главным образом, за счет действий метастабильных атомов (поверхностного и объемного). Параллельные опыты в парах ртути показали отсутствие аналогичных изменений. В других опытах тех же авторов вокруг зонда

устанавливался световой барьер, который затруднял метастабильным атомам доступ к поверхности зонда, но не мешал направленному излучению. Расположение опыта и результаты показаны на рис. 4 *a* и *b*. Приближение луча света к поверхности зонда вызывало изменение скомпенсированного тока на зонд.

Эти опыты показали, что в освобождении электронов из зонда основную роль играют метастабильные атомы, а не фотоэффект. Аналогичные результаты были получены Дуффендаком и Смитом³⁹.

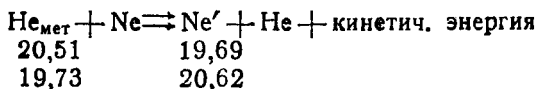
Ряд явлений, наблюдаемых в положительном столбе тлеющего разряда, также находится в прямой связи с действиями метастабильных атомов. Хидрик и Дуффендак⁴⁰ измеряли градиент потенциала в столбе в смесях благородных газов He, Ne, Ar между собой и в смеси каждого из этих газов с парами ртути. Одновременно с измерением поля производилось наблюдение над изменением спектральной характеристики столба при перемене состава газов в смеси. Опыты происходили при силе разрядного тока от 20 до 40 мА и давлении газа от 5 до 30 мм Hg. Авторы нашли, что прибавление паров ртути при комнатной температуре к неону вызывает уменьшение поля в столбе на 45%, в то время как прибавление ртути к аргону или гелию вызывает небольшой рост его. При содержании паров ртути в смеси в количестве 0,03% и более спектры неона и аргона в световой эмиссии столба почти исчезают, и остается лишь спектр ртути. При введении менее чем 0,4% неона или аргона в гелий происходит заметное возрастание электрического поля в столбе, и эмитируемый спектр почти полностью переходит от дугового спектра гелия соответственно к неону или аргону. Полученные результаты Хидрик и Дуффендак объясняют действием соударений второго рода между метастабильными атомами и нейтральными атомами другого газа. Необходимым условием для большого эффекта на электрические и спектральные характеристики положительного столба, наблюдающегося при прибавлении к одному газу малой дозы другого, является близкий резонанс, существующий между метастабильными состояниями основного газа. Таким образом согласно Хидрику и Дуффендаку действие метастабильных атомов может не только уменьшать поле в столбе, но в известных случаях и повышать его. Уменьшение поля происходит в тех случаях, когда соударения метастабильных атомов основного газа с нормальными атомами примеси, приводящие к ионизации последних, имеют большую вероятность. Это имеет место, например, в неоне с малой примесью паров ртути. Здесь к тем процессам, которые протекают в столбе в чистом неоне, прибавляется еще процесс, идущий по уравнению.



16,64	16,62	0,07	—0,07
16,54	16,71	—0,08	0,17

где $\text{Ne}_{\text{мет}}$ — метастабильный атом неона, Hg^{+} — возбужденный однократно ионизированный атом ртути, цифры снизу — энергия в электрон-вольтах. Так как между энергией возбуждения метастабильных атомов неона и энергией ионизации атомов ртути с одновременным возбуждением образующихся ионов нет большой разницы, то вероятность написанного процесса в смеси неона со ртутью валика. Но этот процесс ведет к ионизации и, следовательно, к уменьшению поля в столбе по сравнению с чистым неоном. Как уже сказано, спектроскопия дает, что при этом линии ртути выступают резко, тогда как линии неона почти гасятся. Этого надо было ожидать согласно написанному уравнению. В чистом неооне метастабильные атомы разрушаются преимущественно соударениями первого рода с атомами и электронами. В смеси же неона со ртутью метастабильные атомы погибают преимущественно благодаря соударениям второго рода с нормальными атомами ртути, при которых происходят ионизация атомов ртути и одновременно возбуждение иона ртути. Это обстоятельство уменьшает долю энергии, накопленной в метастабильных атомах и теряемой через излучение, и увеличивает долю этой энергии, идущей на ионизацию в столбе. Если бы эффект уменьшения поля был вызван непосредственной ионизацией атомов примеси в условиях опыта, то такое же или, возможно, большее уменьшение поля можно было бы ожидать в смеси гелия с малым количеством ртути. Однако, примесь ртути к гелию не уменьшает поле, а, наоборот, несколько повышает его.

Усиление электрического поля происходит в тех случаях, когда потенциал ионизации атомов примеси выше потенциала возбуждения метастабильного атома основного газа и в то же время существуют возбужденные уровни у атомов примеси, находящиеся в близком резонансе с метастабильным уровнем. При этом условии метастабильные атомы основного газа уже не могут ионизовать атомы примеси, но зато в смеси появится новый процесс, который ведет к разрушению метастабильных атомов. Таким процессом являются соударения метастабильных атомов с атомами примеси, при котором последние возбуждаются за счет энергии метастабильных атомов. Такое явление наблюдается в смеси гелия с малой примесью неона. Потенциал возбуждения метастабильных атомов гелия, как известно, меньше потенциала ионизации атомов неона. Процесс возбуждения атомов неона при соударениях с метастабильными атомами гелия будет протекать согласно уравнению



Здесь Ne' обозначает атом неона, возбужденный на нестабильный уровень. Этот процесс исключает один из процессов, происходящих в чистом гелии по уравнению



ведущий к ионизации метастабильных атомов. Поэтому большое количество энергии, получаемое из поля, благодаря неону теряется на излучение, тогда как в чистом неоне эта энергия шла на ионизацию. Уменьшение коэффициента ионизации вызывает рост поля. Уменьшение поля с прибавлением примеси должно происходить и в том случае, когда потенциал ионизации атомов примеси меньше потенциала возбуждения метастабильного уровня основного газа, но вероятность соударений второго рода, ведущих к ионизации, так мала по сравнению с вероятностью таких соударений между метастабильными атомами и атомами примеси, при которых происходит возбуждение последних, что в результате коэффициент ионизации уменьшается. Такой случай имеет место в смеси гелия с малым количеством аргона.

Как известно, в столбе потеря ионов и электронов на стенках разрядной трубки полностью компенсируется ионизацией в объеме. Если в однородном газе, когда ионизацией метастабильных атомов посредством соударений второго рода можно пренебречь, компенсация потерь на стенках происходит ионизацией в столбе при вполне определенной средней энергии — температуре электронов, то та же компенсация в разряде в смеси газов, когда в ионизации наряду с электронами активное участие принимают метастабильные атомы,

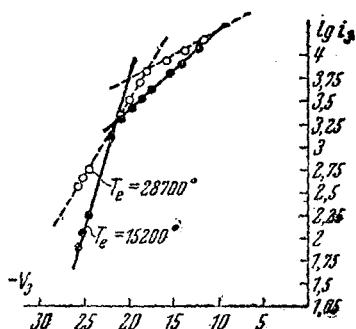


Рис. 5. $I_A = 4$ mA, $V_A = 70$ V

возможна при меньшей температуре электронов. Уменьшение концентрации в этом случае должно, таким образом, вести к повышению температуры электронов T_e . Действительно, Спивак и Рейхрудель⁴¹ наблюдали заметное повышение T_e при освещении разряда в неоне с малой примесью аргона внешним неоновым излучением. На рис. 5 изображены полулогарифмические характеристики зонда, полученные этими авторами в неоне при освещении разряда (пунктир) и без освещения (сплошная кривая). Спивак и Рейхрудель обсуждают возможности тех случаев, когда действие метастабильных атомов должно вызвать не уменьшение T_e , а повышение ее.

Доргело, Алтинг и Боерс⁴² измеряли температуру электронов в столбе в чистом неоне и в неоне в одном случае с примесью аргона, в другом — ртути различной концентрации. Опыты происходили при силе разрядного тока 2 A и давлении газа 5 мм Hg. Оказалось, что примесь аргона к неону вызывает уменьшение, и это уменьшение продолжается непрерывно с ростом давления аргона в смеси. Однако введение в неон паров ртути до 0,32% вызывает повышение T_e , и только при дальнейшем росте концентрации ртути начинается уменьшение T_e и при 0,38% T_e ртути принимает значение меньшее, чем в чистом неоне. Ютерховен и Вербург⁴³ произ-

Одним из измерений температуры электронов в смеси неона с натрием при разрядном токе в 1 А. Концентрация паров натрия определялась температурой стенок разрядной трубки. Авторы также нашли, что малые примеси натрия к неону вызывают рост T_e , которая достигает своей максимальной величины при температуре стенки трубки в 240° , когда концентрация атомов натрия в смеси составляет примерно 0,01%. С дальнейшим ростом примеси натрия T_e уменьшается. Еще раньше Ютерховен и Вербург наблюдали повышение градиента потенциала в положительном столбе в смесях $\text{He} + \text{Na}$, $\text{Ar} + \text{Na}$, $\text{Ne} + \text{Ar}$, $\text{Ne} + \text{Hg}$ и $\text{He} + \text{Cs}$ по сравнению с градиентом в соответствующем чистом благородном газе. Во всех этих случаях смесей газов потенциал ионизации примеси меньше потенциала ионизации основного газа. Поэтому естественно было бы ожидать здесь не повышения градиента, а, наоборот, его уменьшение. Как было сказано, в опытах Хидрика и Дюффендака, примесь паров ртути к неону при комнатной температуре резко уменьшала градиент потенциала. В опытах же Ютерховена и Вербурга, наоборот, пары ртути, введенные в небольшом количестве в неон, вызывают рост электрического поля в столбе. Также в опытах Доргело и его соавторов примесь ртути к неону в небольшом количестве вызывает не уменьшение температуры электронов, как можно было бы ожидать согласно работе Хидрика и Дюффендака, а повышение ее. Это противоречие в результатах опытов Хидрика и Дюффендака, с одной стороны, и опытов Ютерховена, Вербурга и Доргело, Алтинга и Бореса, с другой, объясняется, может быть, различиями в условиях опытов. Хидрик и Дюффендак работали при таких малых токах (20—40 мА), когда роль метастабильных атомов в ионизации в разряде действительно велика. В опытах же Ютерховена, Вербурга, Доргело и его соавторов разрядный ток был настолько значителен (1 А и выше), что особая роль метастабильных атомов в разряде уже в значительной мере терялась.

Влияние ионизации соударениями второго рода при низких давлениях (от 0,5 до 3 мм Hg) и при разрядных токах от 5 до 10 мА на температуру электронов, градиент потенциала в столбе, падение потенциала в слое положительных зарядов на стенке в смесях неона с аргоном и неона со ртутью изучались Зайцевым⁴⁴. Эффект ионизации соударениями второго рода в столбе можно было оценить следующим образом. В разряде в чистом неоне соударения второго рода в объеме столба не играют существенной роли. Роль соударений второго рода делается существенной только в смеси двух газов. Если прибавление к неону маленькой дозы аргона или ртути, при которой ионизация атомов примеси непосредственными соударениями с электронами незначительна, вызывает изменение в характеристике столба, то это изменение при малых токах можно в основном приписать ионизации соударениями второго рода между метастабильными атомами неона и атомами примеси. Однако то значение плотности примеси, при котором соударениями атомов примеси с электронами еще можно пренебречь, очень не велико. С ростом плотности примеси ионизация непосредственными соуда-

рениями с электронами растет. Чтобы точно оценить роль соударений второго рода, необходимо уметь отделить эффект ионизации примеси при соударении второго рода от эффекта ионизации электронами. Уравнения Шоттки, написанные с учетом ионизации ударами второго рода, позволяют произвести это разделение двух эффектов. В самом деле, из теории Шоттки вытекает соотношение

$$\frac{\alpha_1}{\mu_1} + \frac{\alpha_2}{\mu_2} + \frac{\alpha'_2}{\mu_2} = \frac{k}{e} T_e = \frac{2}{3} V_0 \left(\frac{2,4}{R} \right)^2,$$

где α_1 — число ионизаций атомов первого газа, совершаемых одним электроном в единицу времени, α_2 — то же для второго газа, α'_2 — число пар ионов и электронов, образуемых электроном в единицу времени в объеме за счет соударений второго рода, μ_1 и μ_2 — соответственно, подвижности ионов первого и второго газа.

Отношения $\frac{\alpha_1}{\mu_1}$ и $\frac{\alpha_2}{\mu_2}$ могут быть вычислены. И если температура электронов измерена на опыте, $\frac{\alpha'_2}{\mu_2}$ также будет известно. Таким образом величины $\frac{\alpha_2}{\mu_2}$ и $\frac{\alpha'_2}{\mu_2}$ могут

сравниваться для различных смесей газов. Опыты показали, что небольшая примесь аргона к неону уменьшает температуру электронов и также электрическое поле в столбе. Выяснилось при этом, что примерно до плотности аргона в смеси в 0,01% ионизация ударами второго рода играет в эффекте преобладающую роль (рис. 6). При больших плотностях аргона эффект уменьшения температуры и градиента потенциала должен быть уже приписан ионизации примеси непосредственными соударениями с электронами. В случае примеси паров ртути к неону преобладающая роль в ионизации электронами должна начинаться при плотности примеси меньшей чем 0,01%.

В некоторых случаях имел место обратный эффект, т. е. примесь аргона повышала T_e и градиент потенциала. Это явление объясняется, повидимому, тем, что при этом в трубку вместе с аргоном попадали случайные газы. Присутствие случайных благородных газов в трубке даже в незначительном количестве может вызывать заметные эффекты главным образом потому, что они могут служить центрами для образования тяжелых ионов в столбе.

Как известно, падение потенциала в слое положительных зарядов на стенке связано с температурой электронов. С уменьшением T_e

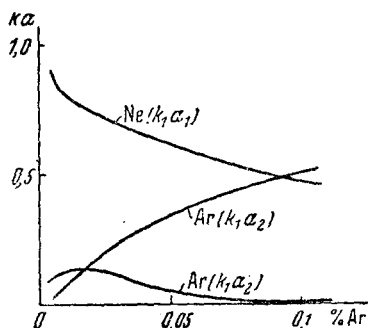


Рис. 6. T_e (в чист. Ne) = 3,2 V, $i_A = 7,5$ mA, $p = 3$ мм Hg

должна уменьшаться величина этого падения. Опыты подтверждают это положение. В табл. 2 приведены измеренные значения падения потенциала в слое при различных смесях. Измерение производилось при освещении разряда внешним излучением и без освещения.

ТАБЛИЦА 2

% Ag в смеси	Падение потенциала в вольтах	
	без освещения	при освещении
0	11	—
0,01	10,5	10,80
0,05	10,2	10,40
0,1	9,9	9,9
1	9,4	9,4

Как видно из табл. 2, примесь аргона к неону в количестве 0,01%, когда ионизация ударами второго рода преобладает над ионизацией электронами, уменьшает падение потенциала в смеси на 0,5 V. Освещение разряда до 0,5% Ag в смеси вызывает рост величины падения, и это непосредственно показывает, что метастабильные атомы в разряде в смеси уменьшают падение потенциала в слое. Освещение положительного столба в неоне с примесью

аргона вызывает также рост градиента потенциала. На рис. 7 показана соответствующая кривая, дающая зависимость эффекта освещения от плотности аргона. По оси абсцисс здесь отложена плотность аргона, по оси ординат — изменение градиента при освещении. Из рисунка видно, что эффект освещения, значительный при малых плотностях примеси, убывает с ростом этой плотности. Изменение градиента потенциала в столбе в неоне при освещении наблюдается также Рейхруделем и Спиваком. На рис. 8 показана полученная ими кривая для зависимости эффекта освещения от величин разрядного тока. По оси абсцисс отложена сила тока, по оси ординат — градиент потенциала при освещении (пунктир) и без освещения. Из рис. 8 видно, что изменение градиента при освещении растет с уменьшением силы тока.

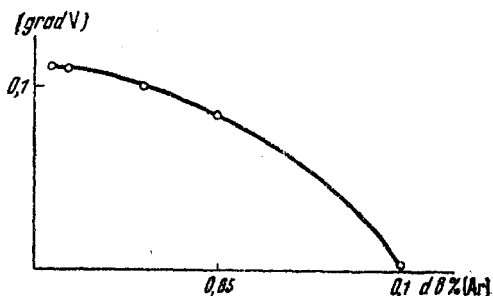


Рис. 7.

б) Эффект в катодных частях разряда. Де Грут¹⁶ наблюдал изменение плотности тока при переходе от нормального разряда в чистом неоне к разряду в неоне с примесью аргона. Это и некоторые другие явления, имеющие место в самостоятельном разряде, объяснены Пеннингом ионизирующей ролью метастабильных атомов. Нормальный разряд представляет собой предельный случай аномального разряда, когда влияние стенок трубки на разряд сводится на-нет. По этой причине для теоретического изучения

нормальный разряд является более простым, нежели аномальный. Однако получение устойчивого нормального разряда связано с большими экспериментальными трудностями. Эти трудности увеличиваются в связи с необходимостью строго контролировать состав газа в опытах, проводимых для изучения роли метастабильных атомов.

Спивак и Рейхрудель¹⁶ изучали влияние метастабильных атомов неона на процессы в катодных частях аномального разряда в чистом неоне и в неоне с малой примесью аргона при низких давлениях (от 0,2 до 1 мм Hg). При этом выяснилось, что метастабильные атомы участвуют как в объемной, так и в поверхностной ионизации. Уменьшение концентрации метастабильных атомов путем освещения разряда соответствующим внешним излучением вызывает рост катодного падения потенциала, если разрядный ток поддерживать постоянным. На рис. 9 показана пара кривых, выражающих изменение потенциала горения при изменении расстояния между электродами.

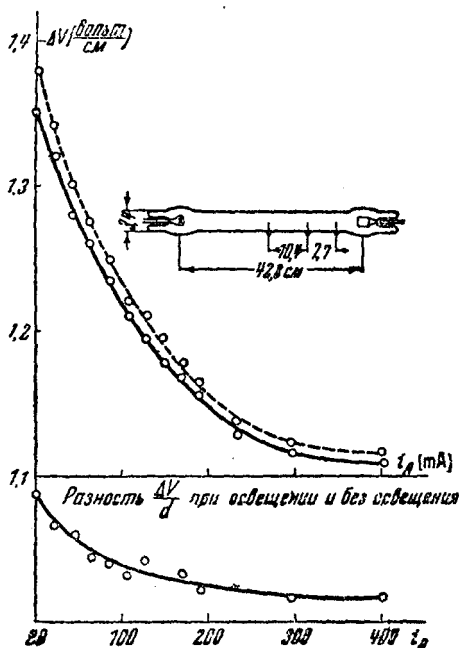


Рис. 8.

По оси ординат отложена разность потенциалов, наложенных на электроды, по оси абсцисс — расстояние между электродами. Параметром здесь служит разрядный ток. Вид кривых ничем не отличается от обычных кривых такого типа, когда при сближении электродов потенциал горения сначала падает (что соответствует „съеданию“ анодных частей разряда и положительного столба анодом), достигается минимум потенциала горения (который в опытах Спивака и Рейхруделя принимается за катодное падение потенциала), затем начинается его рост, вызванный затруднением разряда. В каждой паре сплошная кривая соответствует измерениям без освещения, пунктирная — при освещении разряда внешним излучением. Легко

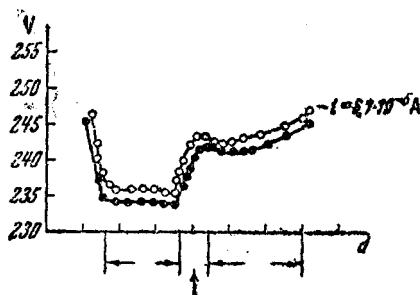


Рис. 9.

видеть, что кривая при освещении идет выше кривой без освещения. Изменение катодного падения потенциала при освещении разряда в чистом неоне сравнительно не велико. Эффект уменьшения концентрации метастабильных атомов освещением достигает значительной величины при прибавлении к неону небольшой дозы аргона ($\Delta V \approx$ до 12V). Увеличение катодного падения потенциала при постоянной силе тока связано с необходимостью компенсировать ослабление ионизации метастабильными атомами в разряде, происходящее вследствие уменьшения их концентрации при освещении, усилением ионизации посредством прямых соударений атомов с электронами. Увеличение ΔV при примешивании аргона к неону объясняется тем, что при этом делается значительной ионизация атомов

аргона метастабильными атомами неона посредством соударений второго рода.

Спиваку и Рейхруделю удалось установить, что величина $\frac{\Delta V}{I}$

(изменение падения потенциала при освещении, рассчитанное на единицу тока) увеличивается с уменьшением разрядного тока. Отсюда авторы делают вывод, что роль ионизации метастабильными атомами в разряде растет с уменьшением тока. Ионизирующее действие метастабильных атомов кажется особенно большим, если в разряде подготовлены условия для перехода его из одной формы в другую, когда малейшее изменение в ионизации может вызывать

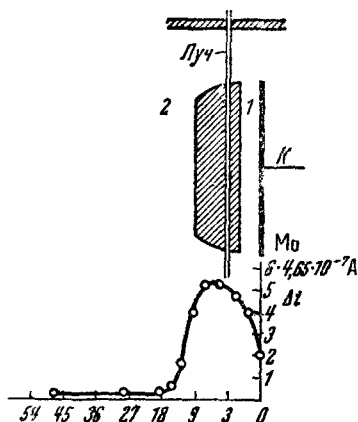


Рис. 10. 1 — к. т. п., 2 — о. т. с.

этот переход, часто сопровождаемый значительным изменением силы тока и заметным изменением внешнего вида разряда. В частности, это влияние на потенциал зажигания и потенциал гашения разряда значительно больше, чем на потенциал горения.

Если потенциал горения разряда поддерживать постоянным, можно наблюдать изменение плотности тока при освещении. Путем наблюдения влияния освещения катодной области разряда по частям на силу тока Спивак и Рейхрудель установили, что концентрация метастабильных атомов в различных частях катодной области неодинакова. Наибольшая концентрация имеет место в отрицательном тлеющем свечении (рис. 10). Отрицательное тлеющее свечение представляет собой излучен с возбужденных атомов. Таким образом место наибольшей концентрации для атомов, возбужденных на обыкновенные уровни, и для метастабильных атомов одно и то же — отрицательное тлеющее свечение. Изучение влияния метастабильных атомов на катодные части разряда в аргоне⁴⁷ приводит к результатам, согласным с результатами, полученными Спиваком и Рейхруделем

в разряде в неоне. Ионизирующая роль метастабильных атомов растет с ростом давления газа в пределах от 0,9 до 4 мм Hg. В некоторых случаях освещение разряда может вызывать не уменьшение разрядного тока при постоянной разности потенциалов на электродах, а увеличение его¹⁾.

4. НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Весьма интересные данные об ионизации метастабильными атомами получены Круйтгофом и Пеннингом⁴⁸ в несамостоятельном разряде в смеси неона с аргоном. Авторами произведено непосредственное измерение величины $\eta = \frac{\alpha}{E}$, где α — коэффициент ионизации Таунсенда и E — электрическое поле в разрядном промежутке, в чистом неоне и в смеси неона с аргоном. Наиболее интенсивная ионизация для смеси Ne + Ar происходит при Ne + 0,1% Ar и $\frac{E}{P} = 3,3 \text{ В/см}$. В этом случае $\eta = \eta_{\text{макс}} = 0,037$. Для малых $\frac{E}{P}$ значения η резко уменьшаются вследствие возрастающих упругих потерь. Возбуждение неона и аргона при этом становится незначительным. Уменьшение η с ростом плотности аргона выше 0,1% объясняется тем, что при большей плотности растет потеря энергии на возбуждение атомов аргона.

С другой стороны, с уменьшением плотности аргона ниже чем 0,1% ионизация метастабильными атомами при помощи ударов второго рода будет убывать в силу недостатка атомов аргона в смеси. Таким образом оказывается, что значения $\frac{E}{P} = 3 \text{ В/см} \cdot \text{мм}$ и плотности аргона 0,1% являются наиболее благоприятными для развития ионизации соударениями второго рода в несамостоятельном разряде в смеси неона с аргоном. С ростом $\frac{E}{P}$ наблюдается такое же небольшое уменьшение η . Это обязано, повидимому, росту потерь энергии электронами на возбуждение более высоких нестабильных уровней неона, происходящему с увеличением поля. Круйтхоф и Дрейвестейн, используя экспериментальные данные, вычисляли вероятность K того, что возбужденный атом неона перейдет на метастабильный уровень и ионизует атом аргона. С ионизацией при соударениях атома аргона с возбужденными на нестабильный уро-

¹⁾ В неопубликованной работе К. Паневкина, проведенной под руководством В. Фабриканта, приводятся данные об измерении концентрации метастабильных атомов в разряде в неоне. Эти данные показывают, что изменение концентрации метастабильных атомов при освещении так велико, что им можно вполне объяснить наблюдения над электрическими параметрами, описанными в этой работе. Работа К. Паневкина показывает также, в согласии с упомянутыми здесь работами по влиянию освещения разряда внешним излучением на его электрические параметры, что точка зрения Фаунда и Лэнгмюра (C. Found a. I. Langmuir, Phys. Rev., 39, 237, 1932) о малой эффективности внешнего излучения в разрушении метастабильных атомов является, повидимому, не вполне правильной.

весь атомный неон не приходится считаться. Вероятность таких соударений незначительна. Вероятность K есть функция $\frac{E}{P}$ и плотности аргона. В табл. 3 приведены вычисленные значения K (через a обозначено отношение давления аргона к полному давлению неона и аргона).

ТАБЛИЦА 3

Значение K в зависимости от a и $\frac{E}{P}$

$\frac{E}{P} \cdot 10^6 a$	0,82	2,93	9,6	28,1	97
0,99	0,025	0,064	0,16	0,34	0,59
1,32	0,029	0,076	0,19	0,40	0,70
3,30	0,023	0,070	0,21	0,42	0,73
3,36	0,028	0,092	0,24	0,454	0,74
5,3	0,023	0,067	0,18	0,38	0,61
7,15	0,016	0,076	0,11	0,32	0,54
10,7	0,020	0,059	0,12	0,25	0,48
17,9	0,020	0,039	0,09	0,15	0,29

Из табл. 3 видно, что наибольшее значение вероятности приходится на $\frac{E}{P} = 3,36$ В/см (в опытах $\eta_{\max}$ имеет место при $\frac{E}{P} = 3,3$ В/см).

Если известны значения K , можно вычислить вероятность q того, что возбужденный на произвольный уровень атом неона перейдет в метастабильное состояние. Известно, что вероятность K можно представить как произведение двух вероятностей $K = q\pi$. Смысл q нам известен, π — вероятность того, что метастабильный атом неона в течение своей продолжительности жизни ионизует атом примеси. Круйгтоф и Пеннинг вычислили q для ряда значений $\frac{E}{P}$.

Действие метастабильных атомов в несамостоятельном разряде экспериментально изучалось также Глотовым⁴⁹. Опыты Глотова позволяют установить, что действия метастабильных атомов в несамостоятельном разряде при некоторых условиях опыта становятся значительными. Учету ионизации ударами второго рода при подсчете коэффициента ионизации α посвящена работа Моралева⁵⁰.

Выводы

Из изложенного ясно, что результаты большого числа экспериментальных работ показывают на значительную роль соударений второго рода в газовом разряде. При известных условиях действие соударений второго рода выступает как основной фактор при объяснении многих явлений, связанных со спектральной и электри-

ческой характеристикой разряда. Поэтому изучение ударов второго рода имеет не только теоретический, но и практический интерес.

Однако количественная оценка эффектов ударов второго рода наталкивается на значительные трудности. Трудности эти связаны, во-первых, с ограниченностью сведений о функциях возбуждения, отчасти также и ионизации, атомов. Наиболее простым, с точки зрения количественного учета явлений, является положительный столб. Явления в катодной области труднее всего поддаются количественному анализу. Причиной этого является, главным образом, искажение электрического поля пространственными зарядами перед катодом. Вопрос о распределении скоростей электронов, диффундирующих через газ в равномерном электрическом поле, также является важным, и его решение необходимо для оценки явлений, связанных с ударами второго рода.

ЛИТЕРАТУРА

1. O. Klein u. S. Rosseland, Z. Physik, 4, 46, 1921.
2. R. Wood, Physik. Z., 13, 353, 1912.
3. G. Carlo u. J. Franck, Z. Physik, 17, 202, 1923.
4. G. Holst u. E. Oosterhuis, Physika, 4, 42, 1924.
5. K. Compton a. C. Eckart, Phys. Rev., 25, 139, 1925.
6. J. Franck u. P. Jordan, Hdb. d. Phys., 23/1, 738, 1936.
7. I. Langmuir, Phys. Rev., 26, 585, 1925.
8. F. Penning, Nature, No. 118, 301, 1926; Physica, 6, 241, 1926.
9. L. Tonks a. I. Langmuir, Phys. Rev., 33, 195, 1929.
10. E. Strauff, Z. Physik, 58, 104, 1929.
11. G. Latysheff, Z. Physik, 65, 3, 1930.
12. А. Энгель и Штенбек, Ф. и Т. газового разряда, ч. I и II.
13. А. Митчелл и М. Земанский. Резонансное излучение и возбужденные атомы, 1936.
14. H. Dorgelo, Physica, 5, 30, 1925.
15. R. Frerichs, Ann. d. Phys., 85, 362, 1928.
16. D. Duffendack a. H. Smith, Phys. Rev., 34, 68, 1929.
17. D. Duffendack a. Wolge, Phys. Rev., 34, 439, 1929.
18. С. Фримш, ДАН, 1936.
19. В. Фабрикант и Ф. Бутаева, Sow. Phys., 9, 383, 1937; И. Фабелинский, Sow. Phys., 11, 390, 1937; В. Фабрикант, А. Канель и Ф. Бутаева, Sow. Phys., 11, 390, 1937.
20. B. Klarfeld a. I. Taraskov, Tech. Phys. USSR, I, 1, 1934.
21. F. Penning, Z. Physik, 57, 729, 1929; Physica, I, 1023, 1934;
22. Б. Кларфельд, Ж. технич. физики, 2, 384, 1932.
23. M. Zemansky, Phys. Rev., 34, 213, 1929.
24. H. Dorgelo, Z. Physik, 34, 766, 1926.
25. K. Meissner u. W. Graffunder, Ann. d. Phys., 84, 1009, 1927.
26. H. Kopfermann u. R. Ladenburg, Z. Physik, 48, 26, 51, 1928, 65, 165, 1930; Rev. Mod. Phys. 5, 243, 1933. Р. Ладенбург, Успехи физич. наук, 14, 729, 1934.
27. S. Levy, Z. Physik, 72, 578, 1931.
28. K. Schön, Ann. d. Phys., 28, 649, 1937.
29. В. Фабрикант и К. Паневкин, ДАН, 1938.
30. I. Langmuir a. H. Mott-Smith, Gen. Elect. Rev., 24, 449, 538, 616, 762, 810, 1924.
31. P. Morse a. W. Uyterhoeven, Phys. Rev., 31, 827, 1928.
32. W. Uyterhoeven a. Harrington, Phys. Rev., 36, 709, 1930,
33. M. Oliphant, Proc. Roy. Soc., 24, 228, 1929.

34. I. Langmuir a. C. Foud, Phys. Rev., 36, 604, 1930; 39, 237, 1932.
 35. G. Spiwak u. E. Reichrudel, Phys. Rev., 42, 580, 1932; Ж. тех-
нич. физики, 3, 983, 1933.
 36. R. Ladenburg, Ber., 16, 770, 1914.
 37. R. Wood, Phil. Mag., 44, 1111, 1922.
 38. C. Kenty, Phys. Rev., 40, 633, 1932.
 39. O. Duffendack a. Smith, Phys. Rev., 1933.
 40. L. Headrick a. O. Duffendack, Phys. Rev., 37, 736, 1931.
 41. G. Spiwak u. E. Reichrudel, Physica, 3, 301, 1936.
 42. H. Dorgelo, H. Alting u. C. Boers, Physica, 2, 959, 1935.
 43. W. Uyterhoeven et C. Verburg, C. R., 202, 1936.
 44. А. Зайцев, Ж. эксп. и теоретич. физики, 1938.
 45. W. ge-Groot, Naturwiss., 15, 818, 1927.
 46. Э. Рейхрудель и Г. Спивак, Ж. эксп. и теоретич. физики, 6,
846, 1936.
 47. А. Зайцев, Ж. эксп. и теоретич. физики, 6, 913, 1936.
 48. A. Kruithoff a. F. Penning, Physica, 4, 430, 1937.
 49. И. Глотов, Ж. эксп. и теоретич. физики, 1937.
 50. С. Моралев, Ж. эксп. и теоретич. физики, 7, 764, 1937.
-