

В. ФАБРИКАНТ и К. ПАНЕВКИН

ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 28 VI 1938)

1. Копферман и Ладенбург⁽¹⁾, Кребс⁽²⁾ и Шён⁽³⁾ исследовали при помощи оптических методов влияние силы тока на концентрацию возбужденных атомов в разрядах, происходящих в инертных газах. Копферман и Ладенбург установили, что концентрации возбужденных атомов на уровнях 3^1P_1 , $3^3P_{0,1,2}$ неона, возрастая с силой тока, достигают некоторых максимальных значений, после чего при дальнейшем увеличении силы тока опять уменьшаются.

Кребс, работая при больших плотностях тока, наблюдал в неоне только вторую часть кривой, т. е. спад концентраций с током.

Шён, наоборот, наблюдал для аргона первую часть кривой—рост концентрации и насыщение. Экспериментальные результаты всех трех работ таким образом хорошо согласуются между собой*.

Однако теоретическое объяснение экспериментальных результатов, данное Копферманом и Ладенбургом и получившее общее признание, вызывает при более детальном анализе весьма сильные сомнения.

Содержание настоящей работы распадается на две части: в первой дается критика теории Копфермана и Ладенбурга; во второй излагается новая точка зрения на экспериментальные результаты, полученные Копферманом и Ладенбургом, Кребсом и Шёном, и выясняется роль отдельных факторов в общем механизме возбуждения атомов при разряде в инертных газах.

2. Копферман и Ладенбург считают, что наблюдавшееся ими насыщение концентрации возбужденных атомов объясняется наступлением равновесия между электронными ударами первого и второго рода. Отсюда вытекает, что максимальные концентрации должны удовлетворять формуле Больтцмана с электронной температурой в показателе. Копферман и Ладенбург вычисляют из концентрации возбужденных атомов при помощи формулы Больтцмана электронные температуры и сравнивают эти температуры с данными зондовых измерений⁽⁴⁾. Значения получаются действительно довольно близкие, что убеждает Копфермана и Ладенбурга в правильности их точки зрения.

Однако проводимое Копферманом и Ладенбургом сравнение не вполне законно, ибо условия разряда, при которых производились их эксперименты, резко отличаются от условий, при которых производились зондовые измерения Зелигера и Гирхерта. Диаметр разрядной трубки у Копфермана и Ладенбурга—10 мм, у Зелигера и Гирхерта—40 мм. Поэтому градиент потенциала в положительном столбе при экспериментах Копфермана и Ладенбурга значительно выше (>3.5 В/см), чем у Зелигера и Гирхерта (≈ 2 В/см). При таких условиях можно, как обычно⁽⁵⁾, считать, что электрон-

* Уже после написания данной статьи появилась работа Крузе⁽¹³⁾, посвященная аналогичным измерениям в гелии. Результаты этой работы в основном согласуются с результатами более ранних работ.

ные температуры относятся, как градиенты (при постоянном давлении). Следовательно Копферман и Ладенбург пользовались для сравнения сильно преуменьшенными значениями электронных температур. Из данных Зелитера и Гирхерта и соотношения градиентов получается для разрядной трубки Копфермана и Ладенбурга электронная температура, равная 4.6 V, превышающая почти в два раза температуру, вычисленную Копферманом и Ладенбургом из результатов оптических измерений (2.6 V). Аналогичные расчеты могут быть выполнены для других токов и для условий опытов Кребса и Шёна. При этом используются результаты зондовых измерений в неоне при больших силах тока (6) и в аргоне (7).

Если взять определенные таким образом электронные температуры и подставить их в формулу Больцмана, то получаются концентрации, на порядки величин превышающие экспериментально наблюдаемые значения.

В табл. 1 приведены результаты таких подсчетов. Как и следовало ожидать, при больших токах расхождения меньше, но при всех условиях экспериментальные данные значительно ниже рассчитанных по Больцману.

Из табл. 1 следует, что условия всех указанных экспериментов весьма удалены от температурного равновесия. Таким образом наблюдавшееся насыщение концентрации в зависимости от силы тока не может быть объяснено наступлением равновесия между ударами первого и второго рода.

Таблица 1
Сравнение экспериментальных данных для концентрации с рассчитанными по Больцману

Автор	В максимуме концентраций		При максимальной силе тока	
	Экспер.	Больцм.	Экспер.	Больцм.
Копферман и Ладенбург	$2 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{13}$
Кребс	$5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$
Шён	$8 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{13}$

3. В справедливости вывода, сделанного в конце второго раздела, можно убедиться еще одним совершенно независимым способом. Насыщение концентраций может объясняться наступлением равновесия между ударами первого и второго рода только в том случае, если в максимуме концентраций разрушение возбужденных атомов происходит, и практически полностью, за счет ударов второго рода с электронами. Если это так, то вероятность ударов второго рода с электронами должна значительно превышать вероятности других процессов разрушения. Для определенности можно условно положить, что равновесие наступает при вероятности ударов второго рода, на порядок величины превышающей вероятность разрушения возбужденных атомов благодаря диффузии к стенкам ($V_a > 50$) (8). Под вероятностью ударов второго рода понимается среднее число ударов второго рода, испытываемых одним возбужденным атомом в секунду (8).

Пользуясь результатами зондовых измерений и значениями определенных таким образом вероятностей, можно определить эффективные сечения возбужденных атомов для ударов второго рода $[Q_{21}(0)]$ (8). В третьем столбце табл. 2 приведены рассчитанные таким способом $Q_{21}(0)$.

С другой стороны, эффективные сечения $Q_{21}(0)$ можно определить из абсолютных концентраций возбужденных атомов при малых токах. Для этого достаточно провести расчет, обратный расчету концентраций

возбужденных атомов, произведенному ранее одним из нас (8). Расчет по существу основан на том, что отношение концентрации возбужденных атомов к продолжительности их жизни равно числу возбуждающих соударений. Из числа возбуждающих соударений и результатов зондовых измерений нетрудно определить эффективное сечение атомов для ударов первого рода $Q_{12}(Vm)$ (в максимуме функции возбуждения). Поскольку эти атомар-

Таблица 2

Эффективные сечения атомов неона и аргона

Автор	$Q_{12}(Vm)$ в см ²	$Q_{21}(0)$ в см ²	
	из конц. при малых токах	из конц. при малых токах	из насыщения
Копферман и Ладенбург . . .	$2.5 \cdot 10^{-18}$	$4 \cdot 10^{-18}$	$9 \cdot 10^{-15}$
Шён	$1.5 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-17}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$

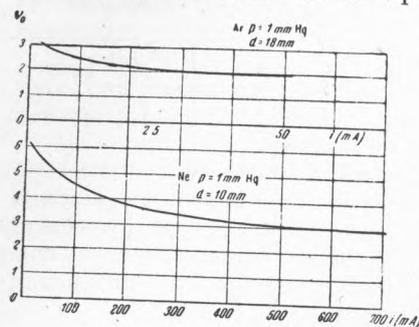
ные константы представляют самостоятельный интерес, они приведены в первом столбце табл. 2. Из $Q_{12}(Vm)$, пользуясь соотношением Клейна-Росселанда, нетрудно определить $Q_{21}(0)$ (9). Во втором столбце приведены $Q_{21}(0)$, определенные таким способом. Эти значения хорошо согласуются со значениями $Q_{21}(0)$ для атомов металлов (9) и безусловно близки к истинным значениям указанных атомарных констант.

Мы видим, что $Q_{21}(0)$, определенные из насыщения, на три порядка величины превышают истинные значения $Q_{21}(0)$. Полученное расхождение показывает, что насыщение вызывается какой-то другой причиной, а не ударами второго рода. Вероятность ударов второго рода слишком мала, чтобы вызвать в исследуемых условиях насыщение концентраций. Полученное расхождение показывает, что действие истинной причины, вызывающей насыщение, эквивалентно увеличению на три порядка вероятности ударов второго рода. Таким образом мы опять приходим к выводу, что насыщение концентрации в условиях опытов Копфермана и Ладенбурга, Шёна не может быть вызвано наступлением равновесия между ударами первого и второго рода.

4. Что же является причиной, вызывающей ход концентрации возбужденных атомов с силой тока, наблюдавшийся Копферманом и Ладенбургом, Кребсом и Шёном?

Ответ на этот вопрос дать нетрудно, если учесть, что атомы инертных газов обладают высокими потенциалами возбуждения. Благодаря высоким потенциалам возбуждения число ударов первого рода между электронами и атомами инертных газов весьма сильно зависит от электронной температуры. Небольшое изменение электронной температуры вызывает резкое уменьшение числа возбуждающих соударений. Вместе с тем известно, что рост силы тока вызывает заметное снижение электронной температуры в разрядах, происходящих в инертных газах (4). Таким образом с ростом тока, с одной стороны, растет концентрация электронов, с другой, падает электронная температура. Наложение обоих факторов дает максимум для числа возбуждающих соударений при некоторой силе тока. При постоянной продолжительности жизни возбужденных атомов ход их концентраций должен просто совпадать с ходом числа возбуждающих соударений при изменении силы тока. Такое объяснение наблюдаемого на опыте хода концентраций диаметрально противоположно объяснению, предложенному Копферманом и Ладенбургом, поскольку в их объяснении основным было уменьшение продолжительности жизни возбужденных атомов, происходящее за счет ударов второго рода.

Можно рассчитать, пользуясь соотношениями, упоминавшимися в третьем разделе, какой должен быть спад электронной температуры, чтобы наблюдался ход концентраций, описанный в указанных выше работах. На фигуре изображены результаты такого расчета, выполненного на основании данных Копфермана и Ладенбурга и Шёна. Из фигуры мы видим, что достаточен небольшой спад электронной температуры V_0 с током, чтобы объяснить все наблюдавшиеся эффекты. Аналогичный спад электронной температуры с током наблюдался непосредственно при разрядах в инертных газах. Следует указать, что развитая здесь точка зрения объясняет весь ход экспериментальных кривых. В частности для объяснения спада концентраций в области больших токов нет необходимости вводить новый процесс — разрушение возбужденных атомов



при соударениях между собой (как это делают Копферман и Ладенбург). Различия в поведении отдельных уровней объясняются различиями в форме функций возбуждения.

На первый взгляд может показаться, что установленный при контрольных опытах ⁽¹⁰⁾ рост концентраций на верхних уровнях 3^1S_0 , 4^1P_1 , 3^3S_1 , $4^3P_{0,1,2}$, $3^3D_{1,2,3}$, 3^1D_2 и т. д. противоречит предлагаемому объяснению, поскольку эти уровни обладают еще более высокими

потенциалами возбуждения. Однако это не так; как показал Доргело ⁽¹¹⁾, эти уровни возбуждаются преимущественно ступенчатым образом. Если же подсчитать ход числа актов ступенчатого возбуждения с током, то получится непрерывный рост. Объясняется это тем, что ступенчатое возбуждение верхних уровней происходит с уровней 3^1P_1 , $3^3P_{0,1,2}$. Потенциал возбуждения при таких процессах порядка 2—3 В и уменьшение электронной температуры практически не сказывается на числе актов возбуждения.

Все сказанное выше показывает, что условия опытов Копфермана и Ладенбурга весьма удалены от температурного равновесия. Отсюда следует, что эффекты, вызываемые отрицательной абсорбцией, должны быть значительно меньшими, чем это предполагают Копферман и Ладенбург. Этот вопрос был более подробно разобран одним из нас в другом месте ⁽¹²⁾.

Выводы. 1. Насыщение концентраций возбужденных атомов, наблюдавшееся Копферманом и Ладенбургом, Кребсом и Шёном, не может быть объяснено наступлением равновесия между ударами первого и второго рода.

2. Основной причиной наблюдавшегося указанными авторами хода концентраций возбужденных атомов является падение электронной температуры с током.

Всесоюзный электротехнический институт,
Москва.

Поступило
29 VI 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Koppermann, R. Ladenburg, ZS. f. Phys., **65**, 167 (1930).
² K. Krebs, *ibid.*, **101**, 604 (1936). ³ K. Schön, Ann. d. Phys., **28**, 649 (1937).
⁴ R. Seeliger, R. Hirschert, Ann. d. Phys., **11**, 817 (1931). ⁵ J. S. Townsend, Journ. of Frankl. Inst., **200**, 563 (1925). ⁶ M. J. Druyvesteyn, ZS. f. Phys., **81**, 571 (1933). ⁷ A. Lompe, R. Seeliger, Ann. d. Phys., **15**, 300 (1932). ⁸ В. Фабрикант, ДАН, XIX, 385 (1938). ⁹ В. Фабрикант, ДАН, XVII, 245 (1937). ¹⁰ R. Ladenburg, S. Levy, ZS. f. Phys., **65**, 189 (1930). ¹¹ Dorgelo, Physica, **5**, 90 (1930). ¹² В. Фабрикант, ИМЕН № (1938). ¹³ M. Kruse, ZS. f. Phys., **109**, 312 (1938).