

В. ФАБРИКАНТ, Ф. БУТАЕВА и И. ЦИРГ

**АБСОЛЮТНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ  
В РТУТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 15 I 1937)

Наиболее изученным типом разряда в смысле его электрических и газодинамических характеристик является ртутный разряд низкого давления. Считается, что в этом разряде большая часть энергии тратится на возбуждение атомов<sup>(1)</sup>. Вместе с тем в литературе нет прямых данных о концентрации возбужденных атомов в ртутном разряде низкого давления. Ладенбург в своем обзоре<sup>(2)</sup> ссылается в этом вопросе на Молера<sup>(3)</sup>, рассчитавшего косвенным методом концентрацию возбужденных атомов в ртутном разряде на основании результатов электрических измерений Киллиана<sup>(4)</sup>. Однако ниже мы увидим, что результаты его расчета вызывают сомнения с точки зрения прямых экспериментальных данных.

§ 1. Цель настоящей работы состоит в прямом определении концентраций возбужденных атомов в ртутном разряде низкого давления. При этом мы определяли концентрации атомов на трех наиболее важных уровнях  $6^3P_{0,1,2}$ .

Из этих трех уровней, как известно,  $6^3P_0$  и  $6^3P_2$  метастабильные, а  $6^3P_1$  является верхним уровнем для резонансной линии 2537. Концентрации определялись абсорбционным методом путем измерения поглощения в разряде линий видимого триплета, оканчивающихся на указанных уровнях: 5461 ( $6^3P_2-7^3S_1$ ), 4358 ( $6^3P_1-7^3S_1$ ), 4047 ( $6^3P_0-7^3S_1$ ).

Объектом абсорбционных измерений служила ртутная разрядная трубка специальной конструкции, применяемая при зондовых измерениях.

Эта трубка имеет жидкий катод, и давление паров поддерживается в ней при помощи водяной ванны, в которую погружен катодный конец трубки. Диаметр трубки был равен 32 мм. Абсорбция измерялась в положительном столбе разряда при силе тока, равной трем амперам, и при различных давлениях паров ( $10^{-4}$ — $10^{-3}$  мм Hg). Выбор условий разряда, при которых производились оптические измерения, был обусловлен тем, что в таких же условиях Клярфельдом были произведены тщательные зондовые измерения.

Так же, как и при исследовании разряда высокого давления<sup>(5)</sup> в качестве источника света для абсорбционных измерений мы применили трубку\*, идентичную исследуемой, причем одновременно изменяли режим в обеих

\* Для получения предварительных результатов применялся автоколлимационный метод, кратко описанный в одном из наших предыдущих сообщений<sup>(6)</sup>.

трубках. Для получения надежных результатов необходимо тщательно следить за тождественностью условий в обеих трубках в течение всего времени измерений\*\*. Измерения интенсивностей производились как субъективным методом (спектрофотометр Кёниг-Мартенса), так и объективным методом (светосильный монохроматор с селеновым фотоэлементом). К сожалению, объективный метод мог быть применен не для всех давлений

Таблица 1

$p$ в мм Hg	5461	4358	4047
$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.35	<0.05	0.22
$9.0 \cdot 10^{-4}$	0.70	0.18	0.40
$2.9 \cdot 10^{-3}$	0.77	0.28	0.55
$7.5 \cdot 10^{-3}$	0.82?	0.56	0.59

ввиду слабой интенсивности излучения разряда. Расхождения между результатами субъективных и объективных измерений лежали в пределах точности (около 5%).

§ 2. В табл. 1 приведены значения абсорбции для линий видимого триплета ртути при различных давлениях паров.

Прежде чем перейти к подробному обсуждению данных, приведенных в табл. 1, мы хотели остановиться на одном чисто оптическом следствии, вытекающем из этих данных. Мы видим, что в области исследованных нами давлений абсорбция линии 5461 наибольшая, затем идет линия 4047, и наконец наименьшая абсорбция у линии 4358. Отсюда следует, что и реабсорбция линии 5461 должна быть наибольшей, затем идет линия 4047, и наконец наименьшая реабсорбция должна быть у линии 4358. Все экспериментальные данные, имевшиеся до сих пор и относившиеся к давлениям от  $10^{-2}$  до 1000 мм Hg, свидетельствовали об обратном соотношении величин реабсорбции (?).

В этих условиях наибольшей реабсорбцией обладала линия 4358, а наименьшей линия 5461, и соответственным образом отклонялось от теоретического соотношение интенсивностей в триplete.

В условиях наших экспериментов отступления в соотношениях интенсивностей в видимом триplete должны носить обратный характер. Линия 5461 должна быть ослаблена по отношению к линии 4358 и 4047.

В табл. 2 в первой строке приведены результаты наших измерений соотношения интенсивностей для давления  $10^{-3}$  мм Hg. Во второй строке приведены теоретические соотношения, а в третьей—данные для давления 200 мм Hg<sup>(8)</sup>. (В четвертой строке—данные для давления  $10^{-3}$  мм Hg в трубке с диаметром в 60 мм при силе тока равной 5 амперам. К этим данным мы вернемся в § 4.)

Мы видим, что экспериментальные данные полностью подтверждают сделанные нами заключения, причем соотношение интенсивностей при  $10^{-3}$  мм Hg весьма сильно отклоняется от теоретического.

Как видно из табл. 1, с ростом давления абсорбция всех трех линий растет. С другой стороны, измерения углового распределения интенсивностей показывают, что реабсорбция линии 5461 падает при давлениях больших, чем  $10^{-2}$  мм Hg<sup>(9)</sup>. Сопоставляя оба эти результата, следует ожидать существование максимума абсорбции для линии 5461 при давлении около  $10^{-2}$  мм Hg.

§ 3. Для перехода от величины абсорбции к концентрации поглощающих атомов необходимо знать абсолютное значение вероятности поглощения (эйнштейновский коэффициент  $B$ ) для соответствующего атомного состояния. Кроме того весьма существенную роль играет форма линий. У ртути абсолютные значения  $B$  пока могут быть определены кроме резонансных линий только для интересующего нас видимого триплета.

Мы при этом исходили из значения продолжительности жизни состояния  $7^3S_1$ , определенного Митчеллем и Морфи<sup>(10)</sup> при помощи поляризационного метода, и пользовались известным соотношением, связывающим эйнштейновские коэффициенты.

\*\* Обе лампы не отпаивались от вакуумной установки.

Таблица 2

5461	4358	4047
100	350	100
100	150	67
100	84	49
100	360	126

Форма линий источника и поглощающего слоя в нашем случае была идентична. Так как мы работали в области низких давлений, то могли считать форму линий чисто доплеровской.

[В разряде высокого давления форма линий чрезвычайно сложна. Это сделало невозможным вычисление абсолютных концентраций из результатов абсорбционных измерений, произведенных ранее в нашей лаборатории для разряда высокого давления <sup>(5)</sup>.]

Тогда для коэффициента поглощения в центре линии получается следующее выражение:

$$k_0 = 1 \cdot 10^{-12} N,$$

где  $N$ —концентрация поглощающих атомов. (Коэффициент при  $N$  рассчитан из абсолютного значения  $B$ , одинакового для всех трех линий триплетта в силу справедливости для него правила сумм и с учетом с. т. с. линий.)

Связь между величиной абсорбции и значением  $k_0$  для случая доплеровской формы линий известны [см., например, таблицу на стр. 323 книги Митчелля и Земанского <sup>(11)</sup>].

Т а б л и ц а 3

$p$ в мм Hg	$N \cdot 10^{-11}$					
	$6^3P_2$		$6^3P_1$		$6^3P_0$	
$2.5 \cdot 10^{-4}$	2.1	45	<0.3	33	1.2	12
$9.0 \cdot 10^{-4}$	7.2	103	0.96	76	2.52	29
$2.9 \cdot 10^{-3}$	10.8	143	1.62	113	4.32	45
$7.5 \cdot 10^{-3}$	13.8?	143	4.50	123	4.92	54

В табл. 3 в столбцах втором, четвертом и шестом приведены концентрации атомов на уровнях  $6^3 P_{0,1,2}$ , рассчитанные таким образом. Следует указать, что при значениях абсорбции  $> 80\%$  определение концентраций становится ненадежным. Небольшим ошибкам в величине абсорбции соответствуют большие ошибки в оценке концентрации. Это обстоятельство ограничивает применимость абсорбционного метода с идентичной формой линий эмиссии и абсорбции. Только варьируя форму линий, можно несколько понизить величину абсорбции и возможно повысить точность определения концентрации.

§ 4. Полученные нами значения для концентрации возбужденных атомов свидетельствуют о том, что исследованные условия разряда далеки от условий температурного равновесия. В табл. 3 в столбцах третьем, пятом и седьмом приведены значения концентраций, соответствующих больцмановскому распределению, рассчитанные из электронных температур, определенных Клярфельдом. Измеренные нами концентрации отличаются от вычисленных таким образом больше, чем на порядок!

Косвенный метод подсчета концентраций, примененный Молером, пригоден по существу своему только для условий, близких к температурному равновесию (например в цезиевом разряде), и явно неточен в условиях, аналогичных нашим. Опыты Киллиана производились при плотности тока еще меньшей, чем у нас, т. е. условия были еще дальше от температурного равновесия и цифры Молера преувеличены.

Кроме того следует указать, что Молер расчеты производил при предположении, что концентрацией на уровне  $6^3P_2$  можно пренебречь по сравнению с концентрациями на уровнях  $6^3P_1$  и  $6^3P_0$ .

Мы видим, что результаты абсорбционных измерений противоречат этому предположению. Правда, поскольку абсорбционные измерения производились в несколько иных условиях, чем опыты Киллиана (мень-

ший диаметр, большая плотность тока), можно было бы усомниться в правильности переноса результатов, полученных в одних условиях, на другие условия. Чтобы устранить это возражение, мы измерили соотношение интенсивностей в видимом триплете у разрядной трубки в условиях, идентичных условиям опытов Киллиана. Результаты измерений (см. четвертую строку табл. 2) указывают на тот же характер распределения атомов по уровням  $6^3P_{0,1,2}$ , что и в нашем случае.

Если же не пренебрегать концентрацией на уровне  $6^3P_2$ , то это приводит к увеличению рассчитанных Молером значений в два с лишним раза (50% всех атомов возбуждено!).

§ 5. Полученное нами распределение атомов по уровням находится в хорошем согласии с функциями возбуждения, рассчитанными для этих уровней Пенни<sup>(12)</sup>. Расчет Пенни показывает, что вероятности возбуждения этих уровней медленными электронами относятся примерно, как их статические веса, т. е. наибольшая вероятность у уровня  $6^3P_2$ .

Расчет, использующий данные об электронной температуре, форму функций возбуждения и предполагающий одинаковость продолжительностей жизни для обоих метастабильных уровней, приводит к соотношениям концентрации на этих уровнях, близким к экспериментальным.

Это свидетельствует о том, что действительно продолжительности жизни обоих уровней близки.

Из абсолютной концентрации атомов на уровне  $6^3P_1$  можно подсчитать интенсивность резонансной линии, вероятность испускания которой равна  $10^{+6}$  (13).

Для давления  $2.9 \cdot 10^{-3}$  мм Hg получается  $5.6 \cdot 10^6$  эрг/сек. Из энергетического баланса разряда следует, что при этих условиях на излучение расходуется примерно  $8 \cdot 10^6$  эрг/сек.

Из сравнения концентраций на уровне  $6^3P_1$  и на уровнях  $6^3P_{0,2}$  можно оценить продолжительность жизни метастабильных атомов (учтя функцию возбуждения уровня  $6^3P_1$ ).

Для давления  $2.9 \cdot 10^{-3}$  мм Hg продолжительность жизни метастабильных атомов примерно равна  $7 \cdot 10^{-6}$  сек.

Продолжительность жизни метастабильных атомов в сосуде тех же размеров, что и разрядная трубка и при том же давлении порядка  $10^{-5}$  сек. (14), причем метастабильные атомы уничтожаются на стенках.

Всесоюзный электротехнический институт.  
Москва.

Поступило  
15 I 1937.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> T. Killian, Phys. Rev., **35**, 1238 (1930). <sup>2</sup> Р. Ладенбург, Усп. физ. наук, **14**, 721 (1934); R. Ladenburg, Rev. Mod. Phys., **5**, 243 (1933). <sup>3</sup> F. Mohler, B. S. Journ. Res., **9**, 493 (1932). <sup>4</sup> T. Killian, ibid. <sup>5</sup> В. Фабрикант и В. Пульвер, ДАН, III, 435 (1934); W. Fabrikant u. W. Pulver, Sow. Phys., **6**, 521 (1934). <sup>6</sup> В. Фабрикант, Ф. Бутаева и И. Цирг, ДАН, IV, 173 (1935). <sup>7</sup> В. Фабрикант, ИМЕН, 3—4 (1936); W. Fabrikant u. F. Butaewa, Sow. Phys., **9**, 383 (1936). <sup>8</sup> H. Krefft u. M. Pirani, ZS. f. techn. Phys., **10**, 393 (1933). <sup>9</sup> W. Fabrikant, A. Kanel u. F. Butaewa, Sow. Phys., **10**, 315 (1936). <sup>10</sup> A. Mitchell a. E. Murphy, Phys. Rev., **46**, 53 (1934). <sup>11</sup> А. Митчелль и М. Земанский, Резонансное излучение и возбужденные атомы, ГТТИ (1936) Москва; A. Mitchell a. M. Zemansky, Resonance Radiation a. Excited Atoms, Cambridge (1934). <sup>12</sup> W. Penney, Phys. Rev., **39**, 467 (1932). <sup>13</sup> Mitchell a. Zemansky, ibid., tabl. 39, p. 231. <sup>14</sup> J. Coulliette, Phys. Rev., **32**, 636 (1928); M. Zemansky, Phys. Rev., **34**, 213 (1929).