

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев, Л. М. Волкова, Исследование положительного столба в парах щелочных металлов. Эффективные сечения и механизм возбуждения энергетических уровней,
ТВТ, 1975, том 13, выпуск 2, 264–269

<https://www.mathnet.ru/tvt7309>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.82

17 июля 2025 г., 15:57:49



УДК 537.525.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА
В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ.
ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ И МЕХАНИЗМ ВОЗБУЖДЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ**

А. М. Девятков, Т. Н. Соловьев, Л. М. Волкова

Исследовано уравнение баланса возбужденных атомов в газоразрядной плазме низкого давления в парах натрия, калия, рубидия и цезия. Совокупность электрических и оптических измерений в плазме позволила оценить вклад каждого отдельного процесса, участвующего в заселении и опустошении данного уровня. Даже при низких давлениях с увеличением силы разрядного тока роль ступенчатого возбуждения некоторых нижних уровней сильно возрастает. Основываясь на уравнении баланса, определены эффективные сечения прямого и ступенчатого электронного возбуждения атомов. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными и теоретическими работами. Эффективные сечения ступенчатого возбуждения превышают сечения прямого возбуждения на один-два порядка.

В работах [1, 2] приводились результаты исследований электрокинетических характеристик и заселенностей энергетических уровней атомов в плазме паров натрия, калия, рубидия и цезия. В предлагаемой работе представлены данные об эффективных сечениях и механизме возбуждения энергетических уровней атомов этих элементов.

1. Механизм возбуждения того или иного энергетического уровня атома можно выяснить, проведя анализ уравнения баланса атомов на этом уровне. Для k -го уровня в условиях газоразрядной плазмы низкого давления оно имеет вид

$$\alpha_{0k} N_e N_0 + \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{ik} N_e N_i + \delta_k = N_k \left(\frac{1}{\tau_k} + \beta_k N_e + \sum_{m>k} \alpha_{km} N_e + \sum_{j \neq k} \gamma_{kj} N_j \right). \quad (1)$$

Здесь слагаемые учитывают следующие процессы: $\alpha_{0k} N_e N_0$ — прямое возбуждение k -го уровня электронным ударом; $\sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{ik} N_e N_i$ — ступенчатое

возбуждение этого уровня; δ_k — каскадные переходы сверху, включая рекомбинацию. Члены справа соответствуют процессам, разрушающим данный уровень: N_k/τ_k — спонтанные переходы; $\beta_k N_e N_k$ — удары второго рода;

$\sum_{m>k} \alpha_{km} N_e N_k$ — переходы вверх, включая ионизацию; $\sum_{j \neq k} \gamma_{kj} N_k N_j$ — столк-

новения с атомами в j -м состоянии.

Используя измеренные значения концентрации электронов и атомов на различных уровнях, а также энергетическое распределение электронов и эффективные сечения процессов, можно оценить вклад каждого члена

в уравнение баланса (1). В условиях нашего эксперимента для всех атомов, как и в случае цезия [3], все процессы, кроме прямого возбуждения, ступенчатого возбуждения с резонансных уровней и спонтанных переходов, дают ничтожно малый вклад. Поэтому уравнение (1) упрощается

$$\alpha_{0k} N_e N_0 + \alpha_{1k} N_e N_1 = N_k / \tau_k. \quad (2)$$

Поделив обе части уравнения на $N_e N_0$, получим

$$\alpha_{0k} + \alpha_{1k} \cdot N_1 / N_0 = N_k / \tau_k N_e N_0. \quad (3)$$

Из (3) видно, что ступенчатое возбуждение будет играть заметную роль, когда

$$\alpha_{1k} N_1 / \alpha_{0k} N_0 > 1. \quad (4)$$

Константу скорости прямого возбуждения α_{0k} можно найти, зная эффективное сечение этого процесса $Q_{0k}(V)$ и функцию распределения электронов по энергиям $F(V)$: $\alpha_{0k} = \int_{V_{0k}}^{\infty} Q_{0k}(V) F(V) \sqrt{V} dV$. Подставляя для

$Q_{0k}(V)$ аппроксимацию Фабриканта [4] и считая $F(V)$ максвелловской, из (3) получим

$$Q_{0k \text{ макс}} + \frac{N_1 \alpha_{1k}}{N_0 f(V_{0k}, V_{\text{макс}}, V_e)} = \frac{N_k}{\eta_k}, \quad (5)$$

где

$$f(V_{0k}, V_{\text{макс}}, V_e) = 1,8 \cdot 10^8 V_e^{1/2} \frac{b-1}{b^3} \left[2 + b \frac{V_{0k}}{V_e} \right] \exp\left(-\frac{V_{0k}}{V_e}\right), \quad b = 1 + \frac{V_e}{V_{\text{макс}} - V_{0k}}.$$

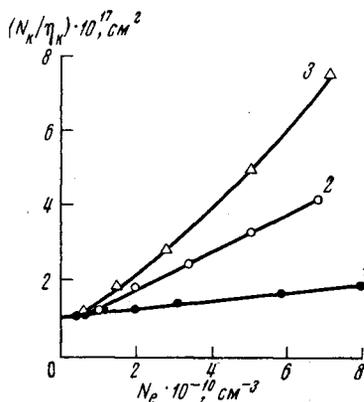
$$\eta_k = \tau_k N_e N_0 f(V_{0k}, V_{\text{макс}}, V_e),$$

V_{0k} , $V_{\text{макс}}$ — порог и положение максимума функции возбуждения k -го уровня; V_e — температура электронов.

Зная экспериментально определенные величины N_k , N_e , N_0 , V_e , $V_{\text{макс}}$ [1, 2] и время жизни уровня τ_k , можно построить зависимость N_k/η_k от параметров разряда, например от концентрации электронов. В случае, когда второй член в левой части

(5) не играет существенной роли, величина N_k/η_k должна оставаться неизменной и равной, как это следует из (5), максимальному значению эффективного сечения прямого возбуждения k -го уровня электронным ударом $Q_{0k \text{ макс}}$. В том случае, когда вторым членом нельзя пренебречь, величина N_k/η_k должна быть больше $Q_{0k \text{ макс}}$. На рисунке показана зависимость N_k/η_k от концентрации электронов для $8^2S_{1/2}$ уровня атома рубидия при трех исследованных значениях давления. При давлении $7 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. величина N_k/η_k от концентрации электронов почти не зависит, а при больших давлениях с увеличением N_e значение N_k/η_k быстро растет. При малых значениях концентрации электронов все три кривые сходятся и их пересечение с осью ординат дает величину $Q_{0k \text{ макс}}$. Аналогичные кривые были построены и определены значения $Q_{0k \text{ макс}}$ для всех исследованных уровней атомов Na, K, Rb и Cs. Исключение составили нижние $7S$ и $5S$ уровни атома цезия, для которых при всех условиях разряда нельзя было пренебречь вторым членом в (5), т. е. ступенчатым возбуждением.

В табл. 1 представлены полученные результаты. Найденные величины $Q_{0k \text{ макс}}$ близки к результатам теоретического расчета [5] и заметно



Зависимость N_k/η_k для $8^2S_{1/2}$ уровня атома рубидия от концентрации электронов:

1 — $p = 7 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; 2 — $2 \cdot 10^{-3}$; 3 — $4,7 \cdot 10^{-3}$

Таблица 1

Эффективные сечения прямого электронного возбуждения атомов ($Q_{\text{пр}} \cdot 10^{18}$, см²)

| Натрий | | | | Калий | | | | Рубидий | | | | Цезий | | | |
|--------|-----------------------------|-------|------|--------|-----------------------------|-------|------|---------|-----------------------------|-------|------|--------|-----------------------------|-------|------|
| уровни | экспери- мент авторов | [6] | [5] | уровни | экспери- мент авторов | [6] | [5] | уровни | экспери- мент авторов | [6] | [5] | уровни | экспери- мент авторов | [6] | [5] |
| 4 S | (70) | (102) | 80,2 | 5 S | (80) | (190) | 106 | 6 S | (65) | (103) | 115 | 7 S | (60) | (180) | 123 |
| 5 S | 15 | 31 | 14,8 | 6 S | 24 | 88 | 19,2 | 7 S | 25 | 63 | 19,7 | 8 S | 20 | 90 | 22 |
| 6 S | 4 | 11 | 5,4 | 7 S | 8 | 23 | 7 | 8 S | 40 | 17,2 | 7,5 | 9 S | 7,5 | 42,5 | 8,1 |
| 7 S | 1,5 | 3 | 2,7 | 8 S | 4 | 11,3 | — | 9 S | 4 | 7,5 | — | 10 S | 3,5 | 25 | — |
| 8 S | 0,6 | 1,5 | — | 9 S | 1,6 | 5,2 | — | 10 S | 2 | 4,5 | — | — | — | — | — |
| 9 S | 0,25 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 5 D | (200) | (350) | 510 |
| 3 D | (130) | (260) | 141 | 3 D | (560) | (870) | 354 | 4 D | (180) | (340) | 422 | 6 D | 70 | (140) | 234 |
| 4 D | 25 | 54 | 36,2 | 4 D | (110) | 250 | 55,5 | 5 D | 45 | 130 | 47,2 | 7 D | 16 | 62 | 10,9 |
| 5 D | 10 | 22 | 14,9 | 5 D | 30 | 65 | 17,8 | 6 D | 15 | 40 | 14,1 | 8 D | 5 | 33 | 4,5 |
| 6 D | 5 | 10 | 7,7 | 6 D | 10 | 29 | 8,7 | 7 D | 7 | 20 | 5,7 | 9 D | 2 | 18 | — |
| 7 D | 2 | 4,2 | 4,5 | 7 D | 4,5 | 14 | — | 8 D | 3 | 10,3 | — | 4 F | (28) | (100) | — |
| 8 D | 1,0 | 2,0 | — | 8 D | 2,0 | 7 | — | 9 D | 1,5 | 5,8 | — | 5 F | 11 | 37,5 | — |
| 9 D | 0,5 | — | — | — | — | — | — | 10 D | 0,8 | — | — | 6 F | 4,8 | 16,0 | — |

меньше экспериментальных значений из [6]. Если для нижних уровней результаты расходятся примерно в два раза, то для более высоких уровней (особенно у атома цезия) это расхождение возрастает до шести — восьми раз. Вероятно, экспериментальные значения для высоковозбужденных уровней в [6] сильно завышены.

Экстраполируя полученные зависимости эффективных сечений в максимуме функции возбуждения от главного квантового числа уровней, можно оценить, как это сделано в [6], величины эффективных сечений нижних неисследованных уровней. Значения сечений, полученные таким путем, в табл. 1 заключены в скобки.

В работе [2] наряду с измеренными значениями концентрации возбужденных атомов приводились и вычисленные значения, полученные в предположении наличия лишь прямого возбуждения. Как видно из табл. 1—4 в [2] и рисунка, для всех щелочных металлов в исследованных условиях разряда при малых силах разрядного тока измеренные и вычисленные значения концентраций атомов на уровнях совпадают, а с ростом силы тока измеренные значения начинают превышать вычисленные. Такой ход измеренных и вычисленных концентраций с ростом силы разрядного тока вызван следующими причинами. При малых силах разрядного тока, когда концентрация электронов мала, а электронная температура относительно высока [1], энергетические уровни атомов заселяются в основном за счет столкновений электронов с атомами в нормальных состояниях. С ростом силы разрядного тока и давления, когда увеличиваются концентрации электронов и атомов на резонансных уровнях, а электронная температура падает, существенным становится ступенчатое возбуждение (выполняется неравенство (4)) и следствием этого является превышение измеренных значений концентрации атомов N_k над вычисленными N_k' . Высокие уровни атомов щелочных металлов в исследованных условиях разрядов возбуждаются прямым путем, а нижние уровни при больших силах разрядного тока (при больших N_e) возбуждаются в основном ступенчато. Такой механизм заселения уровней обусловлен тем (как это будет показано ниже), что эффективные сечения ступенчатого возбуждения с увеличением главного квантового числа уровня уменьшаются гораздо быстрее, чем сечения прямого возбуждения. Для самых нижних 7^2S и 5^2D уровней атома цезия измеренные концентрации атомов при всех силах разрядного тока на порядок превышают вычисленные. Отсюда можно сделать вывод, что эти уровни преимущественно возбуждались ступенчато.

2. Зависимость эффективного сечения ступенчатого возбуждения Q_{1k} от энергии падающего электрона представим в следующем простом виде: $Q_{1k}(V) = 0$ при $V < V_{1k}$ и $Q_{1k}(V) = \bar{Q}_{1k}$ при $V \geq V_{1k}$. В этом случае при наличии максвелловского распределения электронов по энергиям из уравнения баланса (2) получим

$$\bar{Q}_{1k} = [1,8 \cdot 10^{-8} (N_k - N_k') \exp(\frac{3}{2} V_{1k} / V_e)] / \left[\tau_k N_1 N_e V_e^{1/2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{V_{1k}}{V_e} \right) \right]. \quad (6)$$

Эффективное сечение ступенчатого возбуждения \bar{Q}_{1k} — усредненное по максвелловскому распределению и меньше величины сечения в максимуме функции возбуждения $Q_{1k \text{ макс}}$.

По формуле (6) определялись сечения ступенчатого возбуждения двадцати нижних уровней атомов натрия, калия, рубидия и цезия, причем расчеты проводились только в тех случаях, когда N_k в два и более раз превышала N_k' . Это исключало влияние некоторых возможных неточностей в N_k' на определение сечения ступенчатого возбуждения. Результаты представлены в табл. 2. Для сравнения приведены результаты расчетов Вайнштейна, Преснякова [5]. Там же приведены и сечения, вычисленные нами по полумпирической формуле Елецкого, Смирнова [7]. Экспериментальные результаты с точностью до множителя $2 \div 3$ согласуются с расчетными.

Исключение составили 3^2D , 4^2D уровни натрия и 5^2D уровень калия, расхождение для которых большое. Вычисленные по классической теории [8] сечения ступенчатого возбуждения для группы близко расположенных уровней примерно на порядок превышают наши экспериментальные значения.

Таблица 2

Эффективные сечения ступенчатого возбуждения атомов электронным ударом

| Элемент | Уровень | $Q_{1k \text{ макс}} \cdot 10^{16}$, см ² | | $\bar{Q}_{1k} \cdot 10^{16}$, см ² | $Q_{1k}/Q_{0k \text{ макс}}$ | Элемент | Уровень | $Q_{1k \text{ макс}} \cdot 10^{16}$, см ² | | $\bar{Q}_{1k} \cdot 10^{16}$, см ² | $Q_{1k}/Q_{0k \text{ макс}}$ |
|---------|---------|--|------|---|------------------------------|---------|---------|--|-----|---|------------------------------|
| | | [5] | [7] | | | | | [5] | [7] | | |
| | | | | эксперимент авторов | | | | | | эксперимент авторов | |
| Натрий | 5S | -- | 1,1 | 1,0 | 6,7 | Рубидий | 7S | -- | 1,5 | 2,0 | 8,0 |
| | 6S | -- | 0,25 | 0,2 | 5,0 | | 8S | -- | 0,5 | 0,5 | 5,0 |
| | 3D | 102 | 123 | 20 | 15 | | 9S | -- | 0,2 | 0,1 | 2,5 |
| | 4D | 9,8 | 6,9 | 2,0 | 8,0 | | 5D | 2,0 | 3,5 | 3,0 | 6,7 |
| | 5D | -- | 1,6 | 0,6 | 6,0 | | 6D | -- | 1,9 | 1,0 | 6,7 |
| Калий | 6S | -- | 1,7 | 1,5 | 6,3 | 7D | -- | 1,0 | 0,3 | 4,3 | |
| | 7S | -- | 0,4 | 0,2 | 2,5 | Цезий | 7S | 46 | 82 | 65 | 108 |
| | 5D | -- | 0,1 | 1,0 | 3,3 | | 8S | -- | 2,4 | 2,0 | 10 |
| | 6D | -- | 0,1 | 0,2 | 2,0 | | 5D | 270 | 465 | 300 | 150 |
| | | | | | 6D | | 24 | 48 | 20 | 29 | |
| | | | | | | 7D | -- | 8,8 | 2,6 | 16 | |

В последнем столбце табл. 2 приведены отношения сечений ступенчатого возбуждения \bar{Q}_{1k} к величинам сечений прямого возбуждения $Q_{0k \text{ макс}}$. Для самых нижних исследованных 7^2S и 5^2D уровней атома цезия эффективные сечения ступенчатого возбуждения на два порядка превышают сечения прямого возбуждения. Для остальных уровней атомов это превышение составляет примерно один порядок, за исключением верхних уровней, где это превышение составляет два-три раза. Эффективные сечения ступенчатого возбуждения очень быстро (быстрее, чем сечения прямого возбуждения) уменьшаются с ростом главного квантового числа уровня.

Из классической теории [8] следует, что отношение максимальных величин сечений ступенчатого и прямого возбуждений обратно пропорционально примерно третьей степени отношения потенциалов возбуждения

$$\frac{Q_{1k \text{ макс}}}{Q_{0k \text{ макс}}} = \left(\frac{V_{0,k+1}}{V_{i,k+1}} \right)^2 \frac{V_{0k}}{V_{ik}} \approx \left(\frac{V_{0k}}{V_{ik}} \right)^3. \quad (7)$$

Так как величина V_{0k}/V_{ik} при фиксированном i с ростом k уменьшается, то и отношение сечений $\bar{Q}_{1k}/Q_{0k \text{ макс}}$ должно падать с увеличением главного квантового числа. Формула (7) хорошо подтверждается нашими экспериментальными результатами для атомов щелочных металлов и результатами других авторов для атомов ртути [9, 10], неона [11], кадмия [12] и гелия [13]. К такой зависимости (7) приводят квантовомеханические расчеты Омидвара [14] для атома водорода, причем справедливость формулы (7) наблюдается для сечений ступенчатого возбуждения с любых промежуточных возбужденных состояний. Таким образом, эксперименты для различных атомов, квантовомеханические расчеты для атома водорода и классическая теория дают одинаковую зависимость отношения сечения ступенчатого возбуждения к сечению прямого возбуждения от отношения потенциалов возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев, Л. М. Волкова.* Теплофизика высоких температур, 12, № 4, 1974.
 2. *Л. М. Волкова, А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев.* Теплофизика высоких температур, 12, № 6, 1155, 1974.
 3. *Л. М. Волкова, А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев, И. А. Канавец.* Вестн. МГУ, Серия физ. и астр., № 1, 67, 1968.
 4. *В. А. Фабрикант.* Докл. АН СССР, 15, 451, 1937.
 5. *Л. А. Вайнштейн, Л. А. Пресняков.* Препринт ФИАН СССР, 1966.
 6. *И. П. Запесочный.* Теплофизика высоких температур, 5, 7, 1967.
 7. *А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов.* Ж. техн. физ., 38, 3, 1968.
 8. *В. И. Очкур, А. М. Петрунькин.* Оптика и спектроскопия, 14, 457, 1963.
 9. *В. А. Фабрикант, Ф. А. Бугаева, И. П. Цирг.* Ж. эксперим. и теор. физ., 8, 35, 1938.
 10. *К. И. Розгачев.* Оптика и спектроскопия, 4, 549, 1958.
 11. *С. Э. Фриш, В. Ф. Ревад.* Оптика и спектроскопия, 15, 726, 1963.
 12. *Н. П. Пенкин, Т. П. Редько.* Оптика и спектроскопия, 20, 197, 1966.
 13. *Ю. З. Ионих.* Оптика и спектроскопия, 26, 31, 1969.
 14. *К. Omidvar.* Phys. Rev., 140, A38, 1965.
-