

Газовый разряд и его классификации

Что такое газовый разряд:

- a) любой процесс протекания электрического тока через ионизированный газ.***
- b) любой процесс возникновения ионизации в газе под действием электрического поля.***

Общие сведения о газовых
разрядах

(Рохлин Г.Н. Разрядные источники
света, стр. 13-14)

Электродные разряды

- Тлеющий разряд: “холодный” катод. γ -процессы на катоде: вторичная электронная эмиссия: положительные ионы, метастабильные атомы, фотоны.
- Дуговой разряд: “горячий” катод. Термоэлектронная эмиссия с катода. Разогрев катода током разряда, либо током цепи накала.
- Высоковольтный разряд: автоэлектронная эмиссия. “Вырывание” электронов из катода электрическим полем с напряженностью высокой величины ($E_k \geq 100$ кВ/см).

Безэлектродные разряды

- *Емкостной разряд.* На внешней поверхности колбы размещены две обкладки конденсатора, к которым прилагается ВЧ напряжение. В объеме колбы возникает “потенциальное” ВЧ электрическое поле (градиент потенциала), ускоряющее электроны, которые ионизируют атомы газа/пара.

- *Индукционный разряд.* Разрядную колбу охватывает катушка индуктивности, по которой протекает ВЧ ток индуцирующий в объеме колбы/трубки вихревое (замкнутое) ВЧ электрическое поле, ускоряющие электроны, ионизирующие атомы газа/пара.

- *СВЧ разряд.* Магнетрон ($f = 2,45$ ГГц) возбуждает в сетчатом цилиндрическом металлическом резонаторе стоячие ЭМ волны с высокой напряженностью поля (пучность), в области которой, внутри резонатора, размещена разрядная колба. Электрическое поле ускоряет электроны в области пучности, а те - ионизируют атомы

Столкновительные и излучательные процессы в разряде

- I. Электронные и атомные соударения/столкновения.
- II. Генерация излучения, резонансное и нерезонансное излучение.
- III. Взаимодействие излучения с атомами/молекулами.

(Рохлин Г.Н. Разрядные источники света.
Глава 2. стр. 20-42.)

1. Электронные и атомные соударения/столкновения

- 1. Упругие столкновения**
- 2. Неупругие столкновения**
- 3. Ионизация**
- 4. Перезарядка ионов с нейтральными частицами**
- 5. Рекомбинация**
- 6. Диссоциация молекул**
- 7. Прилипание электронов**

Характеристики упругих соударений:

- а) Неизменность числа частиц, участвующих в соударении.
- б) Неизменность внутренней структуры и внутренней энергии этих частиц

Изменяется

поступательное движение частиц: их скорость (u) энергия ($mu^2/2$) и направление (импульс, mu).

В результате упругого соударения электрона с “неподвижным” атомом электрон теряет (передает атому) весьма малую долю своей энергии:

$$\chi \sim 2me/M \approx 1/1828 A$$

me – масса электрона, M - масса атома, A – его атомный вес
 $1/1828$ – доля энергии, передаваемая электроном в результате его упругого соударения с “неподвижным” атомом водорода

Упругие столкновения электронов с атомами

эффективное сечение столкновения:

$$q_{eA} = \pi r_{эффA}^2 \quad [\text{см}^2]$$

Частота упругих столкновений:

$$v_{eA} = q_{eA} N_A v \quad [1/\text{с}].$$

N_A – концентрация атомов сорта A

v – скорость электрона

средняя тепловая скорость электронов при Максвелловском распределении по скоростям:

$$\langle v_m \rangle = (8kT_e/\pi m_e)^{1/2} \quad [\text{см/с}]$$

$$f_{eM}(v) = (4/\sqrt{\pi}) (m_e/2kT_e)^{1/2} (m_e v^2/2kT_e) \exp(-m_e v^2/2kT_e)$$

– функция Максвелла

T_e – температура электронов, соответствующая их средней скорости $\langle v_m \rangle$

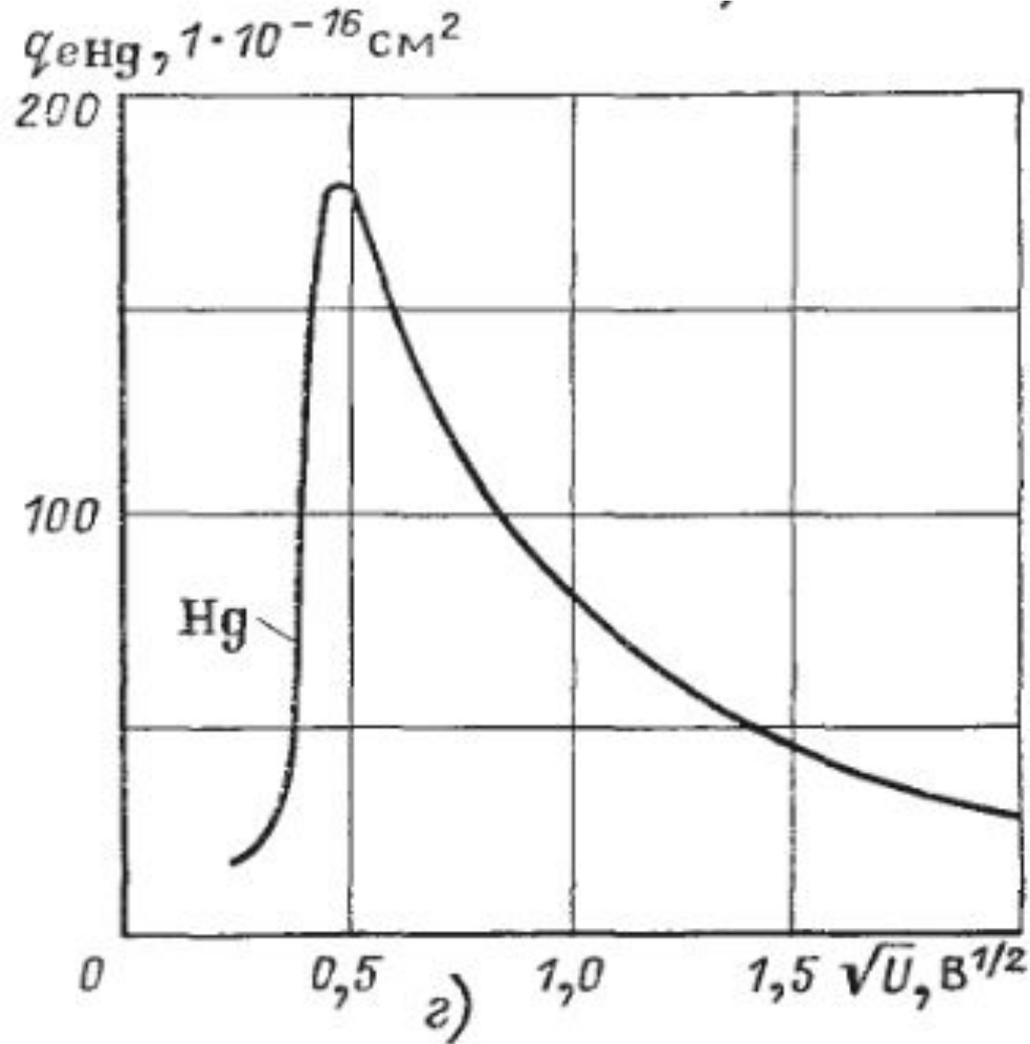
среднее время между столкновениями: $\tau = 1/v_{eA} \quad [\text{с}]$

длина свободного пробега: $\lambda_e = 1/N_A q_{eA} \quad [\text{см}]$

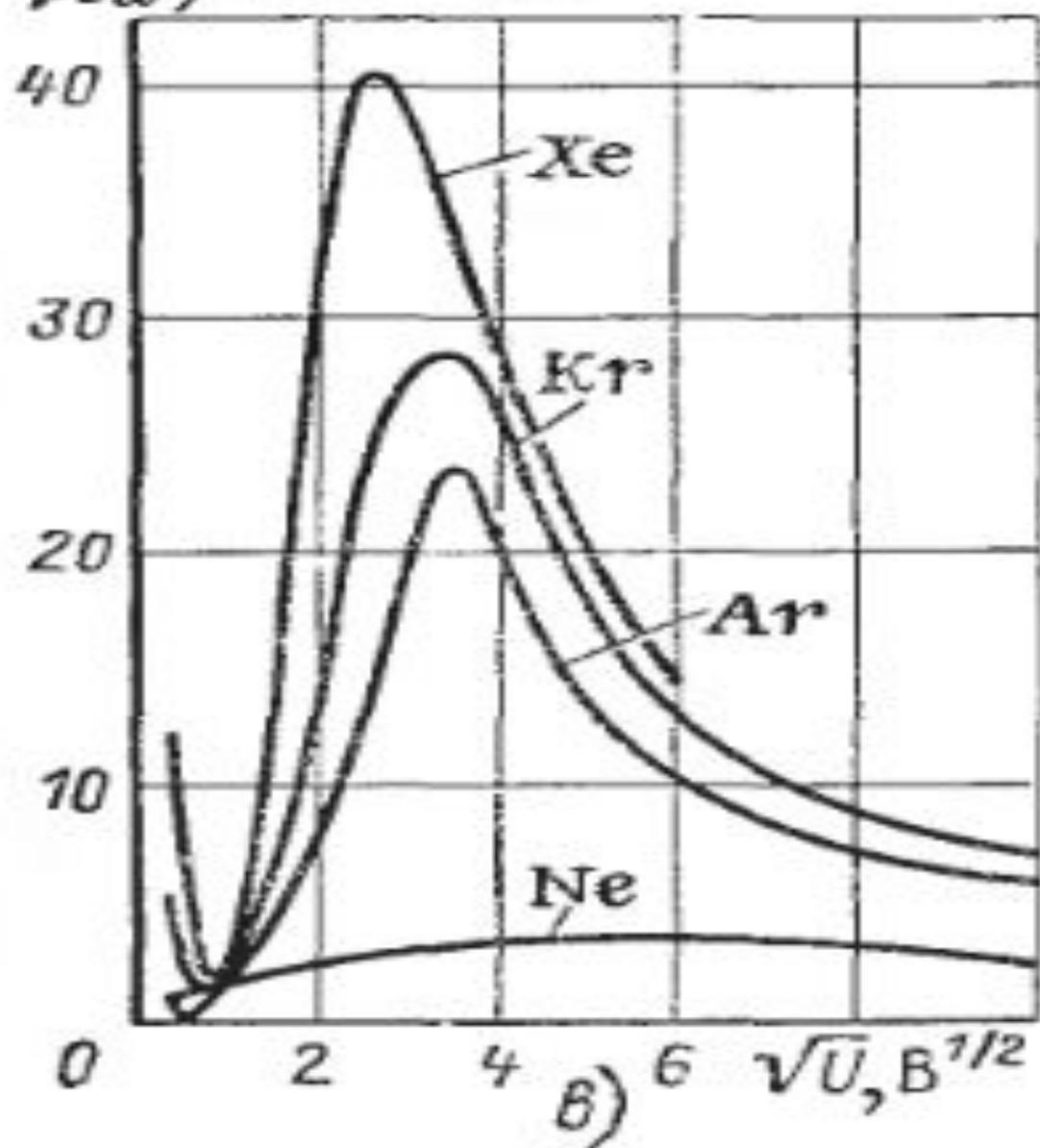
В смеси газов:

$$\lambda_e = 1/\sum_i n_i q_i \quad [\text{см}]$$

Сечение упругого соударения электрона с атомом ртути



$q_{e\alpha}, 1 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$



Неупругие соударения электронов с атомами

Рохлин Г.Н. “Разрядные источники
света”.

Стр. 28-30, 33 -40.

Какие взаимодействия являются *неупругими*

«Сумма кинетических энергий частиц, участвующих во взаимодействии, изменяется за счет их внутренней энергии (всех или некоторых из них)».

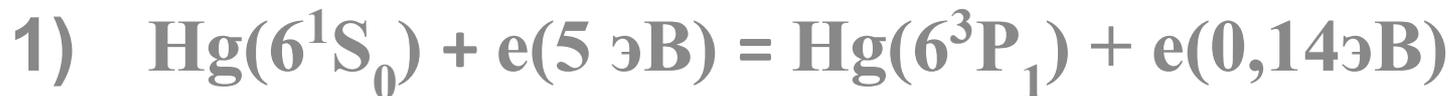
Примеры :

- возбуждение электронами (атомов, молекул, ионов) и ионами (атомов, молекул,)
- ионизация (атомов, молекул и т.д),
 - диссоциация молекул ударом электрона,
- рекомбинация электронов с ионами,
 - захват электрона молекулой (“прилипание”)
 - удары второго рода (“тушение”) возбужденных атомов электронами)

Удары первого рода

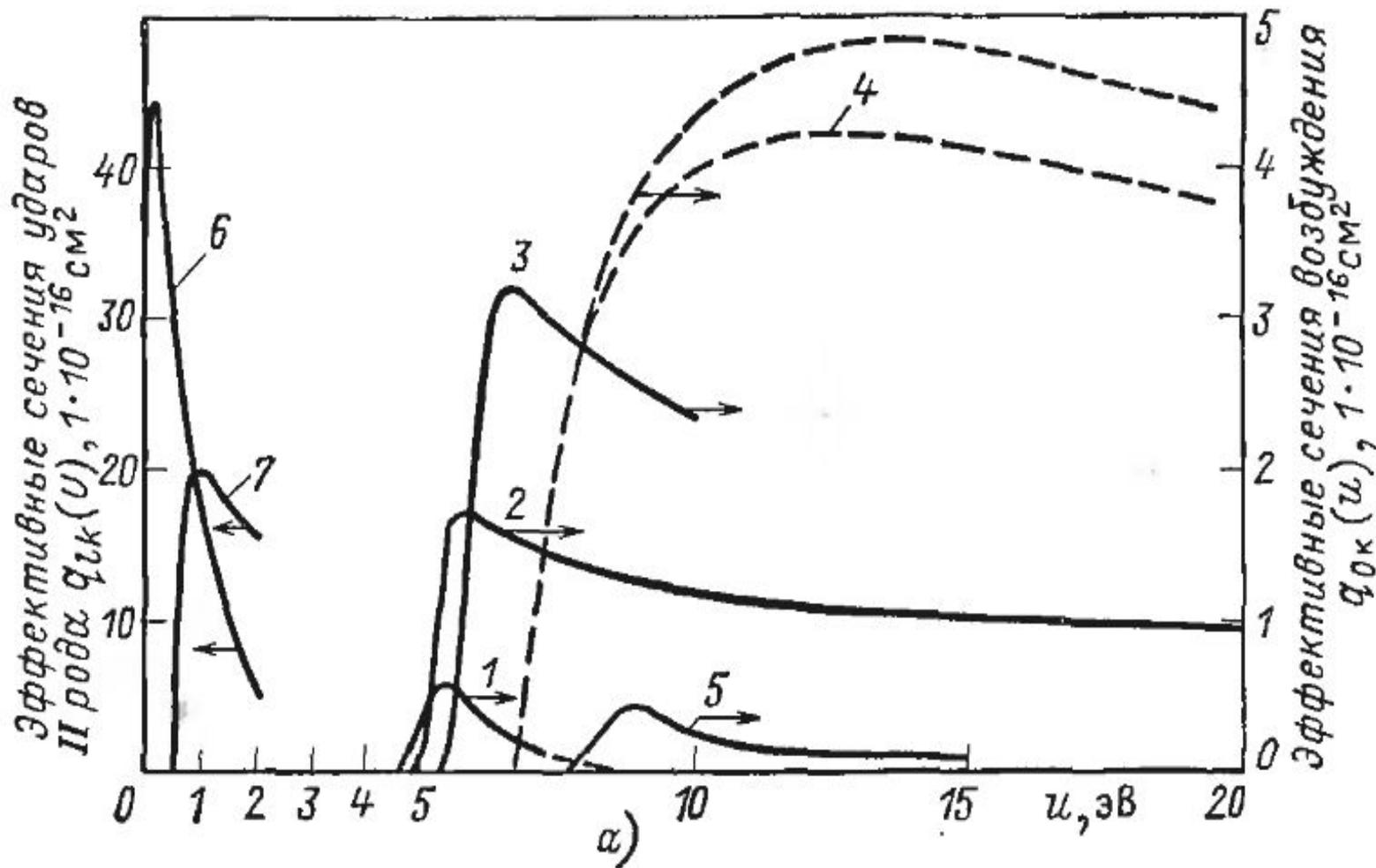
1. В результате соударения суммарная внутренняя энергия соударяющихся частиц возрастает

2. В результате соударения с электроном атом переходит в возбужденное состояние с большей энергией



3) Кинетическая энергия атомов не изменяется!!

Сечения возбуждения атомов ртути электронами



Удары второго рода

В результате соударения с электроном энергия возбуждения атома уменьшается (напр., атом переходит в невозбужденное состояние),

а кинетическая энергия электрона – возрастает.



Кинетическая энергия атомов неизменна!!

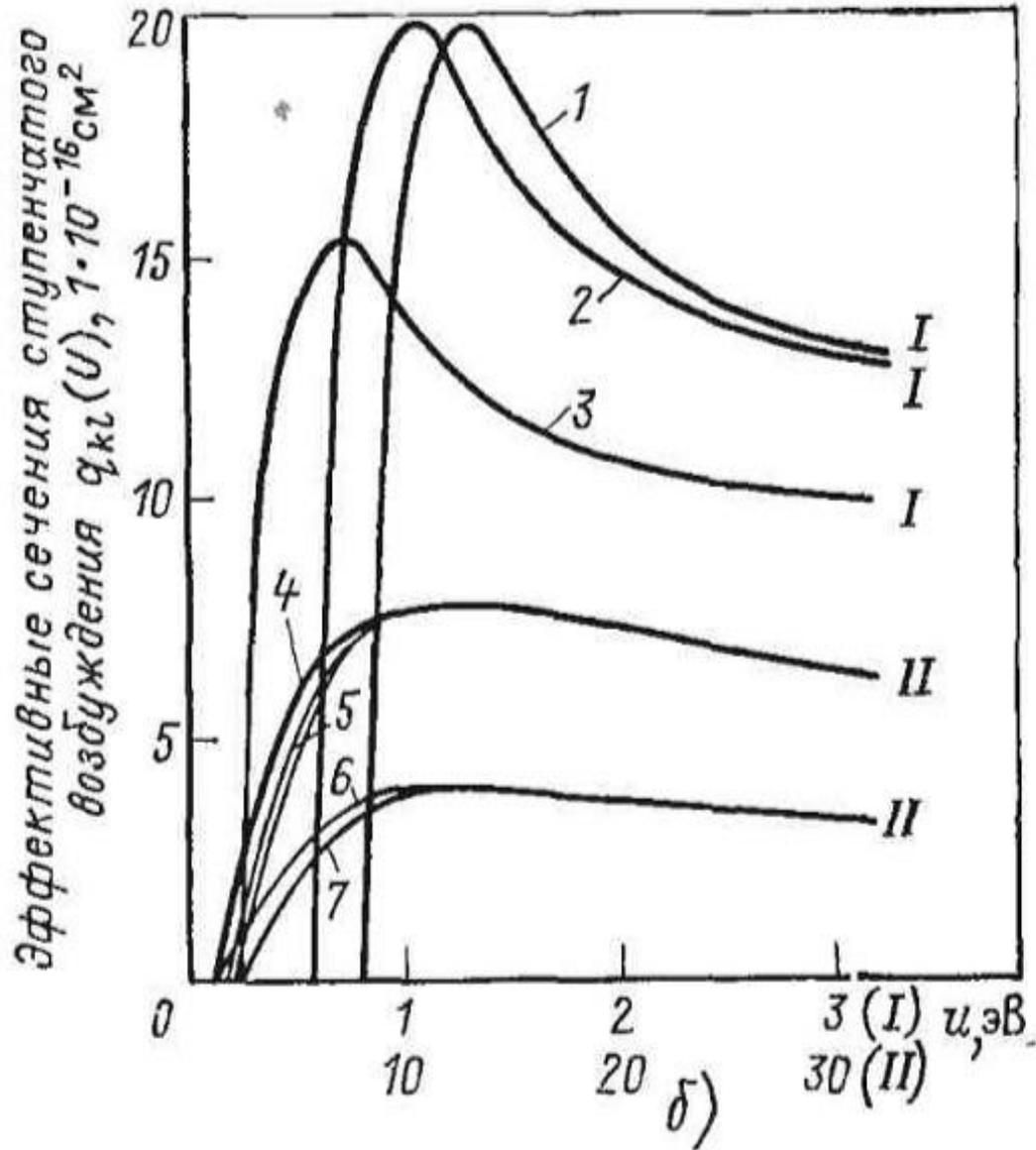


Рис. 2.9. Эффективные сечения возбуждения и ударов II рода атомов ртути электронами для некоторых наиболее важных переходов:

a — эффективные сечения возбуждения четырех *P*-уровней и уровня 7^3S ртути из нормального состояния (по расчетам К. Кенти [2.6] и других авторов); 1 — $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$; 2 — $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$; 3 — $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_2$; 4 — $6^3S_0 \rightarrow 6^1P_1$; 5 — $6^1S_0 \rightarrow 7^3S_1$; удары II рода; 6 — $6^3P_2 \rightarrow 6^3P_1$; 7 — $6^3P_1 \rightarrow 6^3P_2$; *b* — эффективные сечения ступенчатого возбуждения некоторых уровней ртути: 1 — $6^3P_0 \rightarrow 6^3P_2$; 2 — $6^3P_1 \rightarrow 6^3P_2$; 3 — $6^3P_0 \rightarrow 6^3P_1$; 4 — $6^3P_2 \rightarrow 6^1P_1$; 5 — $6^3P_{0,1} \rightarrow 6^1P_1$; 6 — $6^1P_1 \rightarrow 7^3S_1$; $7^3S_1 \rightarrow 6^3D$; 7 — $6^3P_2 \rightarrow 7^3S_1$, $6^1P_1 \rightarrow 6^3D$ (по расчетам А. С. Федоренко и других авторов)

*Аппроксимация сечений неупругих
возбуждающих соударений*
(формула Фабриканта В.А.)

$$q_{kl}(U) \approx 2.72 q_{kl\max} \frac{U - U_B}{U_{\max} - U_B} e^{-\frac{U - U_B}{U_{\max} - U_B}}$$

U – энергия электрона [В]

$q_{kl\max}$ – сечение соударения при $U = U_{\max}$

$U_B = U_l - U_k$ - разница энергий (в потенциалах)
между уровнями k и l

Таблица прямых и ступенчатых переходов

Таблица 2.2

Элемент	Переход	Разность потенциалов, В	U_{max} , В	$q_{I_{k,max}}$ $1 \cdot 10^{-16}$ см ^{2*}
H	$1^2S_{1/2} - 2^2P_{1/2}$	10,15	20	—
He	$1^1S_{1/2} - 2^1P_1$	21,20	—	—
He	$4^1P_1 - 4^1D_2$	—	50	—
Ne	$2^1S_0 - 3^1P_1$	—	—	—
Ar	$3^1S_0 - 4^3P_1$	11,60	—	—
Na	$3^2S_{1/2} - 3^2P_{1/2, 3/2}$	2,10	7—8	~34
Hg	$6^1S_0 - 6^1P_1$	6,67	13	4,2—4,8
Hg	$6^1S_0 - 6^3P_0$	4,70	5,5	0,6
Hg	$6^1S_0 - 6^3P_1$	4,89	5,6	1,7
Hg	$6^1S_0 - 6^3P_2$	5,40	6,8	3,2
Hg	$6^1S_0 - 7^3S_1$	7,69	9	0,45
Hg	$6^3P_0 - 7^3S_1$	3,04	~12	4
Hg	$6^3P_1 - 7^3S_1$	2,83	~12	4
Hg	$6^3P_2 - 7^3S_1$	2,26	~12	4
Hg	$6^3P_1 - 6^3P_2$	0,57	~1,1	~19,5
Hg	$6^3P_0 - 6^3P_1$	0,20	~0,8	~15

* $Q_{12} \approx 3,54 \cdot 10^{16} q_{12}$, см²/см³ [см. (2.8)].

Прямое и ступенчатое возбуждение

$$1) \text{Hg}^0 + e_1(U_1) = \text{Hg}^k + e_1(U_2)$$
$$U_1 = U_{\text{B}}^k + U_2$$

$$2) \text{Hg}^k + e_2(U_3) = \text{Hg}^l + e_2(U_4)$$
$$U_3 = U_{\text{B}}^l - U_{\text{B}}^k + U_4$$

**Кинетическая энергия атомов
неизменна!!**

Частота возбуждения атомов электронами

$\nu_{kl} = q_{kl} N_k v_e$ [1/с] – частота возбуждающих соударений электрона со скоростью v_e с атомами, возбужденными до уровня k с концентрацией N_k , переводящих их на уровень l (в 1 с в 1 см³).

$q_{kl}(v_e)$ - сечение возбуждения электроном со скоростью v_e атома N_k с уровня k на уровень l . N_k - концентрация атомов N , возбужденных до уровня k .

Число возбужденных электронами n_e атомов N_k с уровня k на уровень l (в 1 с в 1 см³):

$$Z_{kl} = n_e N_k \int q_{kl}(v_e) v_e f_e(v_e) dv_e = n_e N_k \alpha_{kl} \text{ [см}^3/\text{с]}$$

(интеграл от 0 до ∞),

$f_e(v_e) = (dn_e/dv_e)/n_e$ - функция распределения электронов по скоростям [1/см/с].

По энергиям: $f_e(\epsilon_e) = (dn_e/d\epsilon_e)/n_e$

Вероятности возбуждения и “тушения” атомов электроном

Максвелловское распределение электронов по скоростям:

$$f_{eM}(v_e) = (4/\sqrt{\pi}) (m_e/2kT_e)^{1/2} (m_e v_e^2/2kT_e) \exp(-m_e v_e^2/2kT_e),$$

или по энергиям ($\epsilon_e = m_e v_e^2/2 = eU$):

$$f_{eM}(\epsilon_e) = (2/\sqrt{\pi}) (1/kT_e)^{3/2} (m_e v_e^2/2kT_e) \sqrt{\epsilon_e} \exp(-\epsilon_e/kT_e),$$

Выражения для вероятностей 1 и 2 рода неупругих соударений имеют вид:

1-го рода (возбуждение):

$$\alpha_{kl} = (\sqrt{8e/\pi m_e})(e/kT_e)^{3/2} \int q_{kl}(U) U \exp(-eU/kT_e) dU$$

2-го рода (тушение):

$$\beta_{lk} = (\sqrt{8e/\pi m_e})(e/kT_e)^{3/2} \int q_{lk}(U) U \exp(-eU/kT_e) dU$$

(интегрирование от 0 до ∞)

Ионизация атома электроном

**Рохлин Г.Н. “Разрядные источники
света”.**

стр. 33-35; 40-41. Рис 2.10

Два типа ионизаций

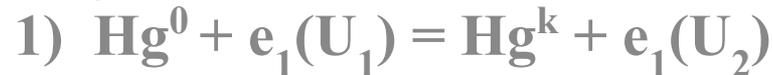
1. Прямая ионизация



$$U_1 = U_i + U_2 + U_3$$

U_i – потенциал ионизации

2. Ступенчатая ионизация



$$U_1 = U_k + U_2 \quad U_k \text{ – потенциал возбуждения}$$



$$U_1 = (U_i - U_k) + U_2 + U_3$$

U_i – потенциал ионизации

*Кинетические энергии атомов не
изменяются!!*

Сечения прямой ионизации

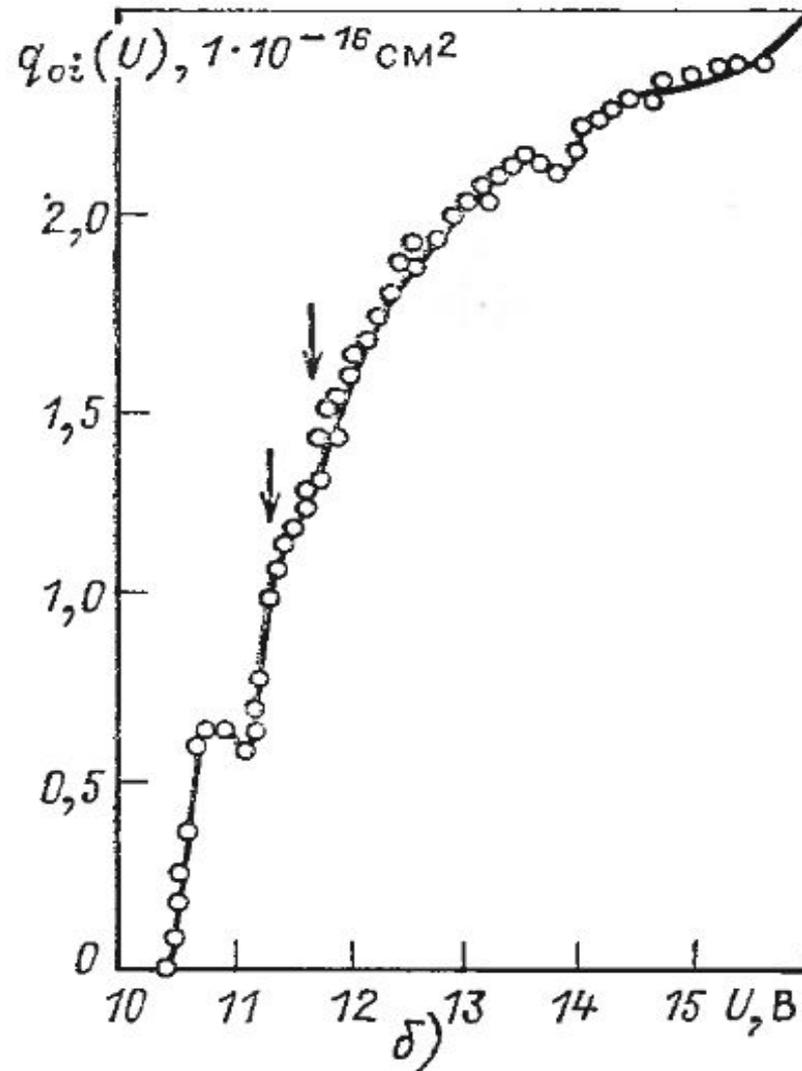
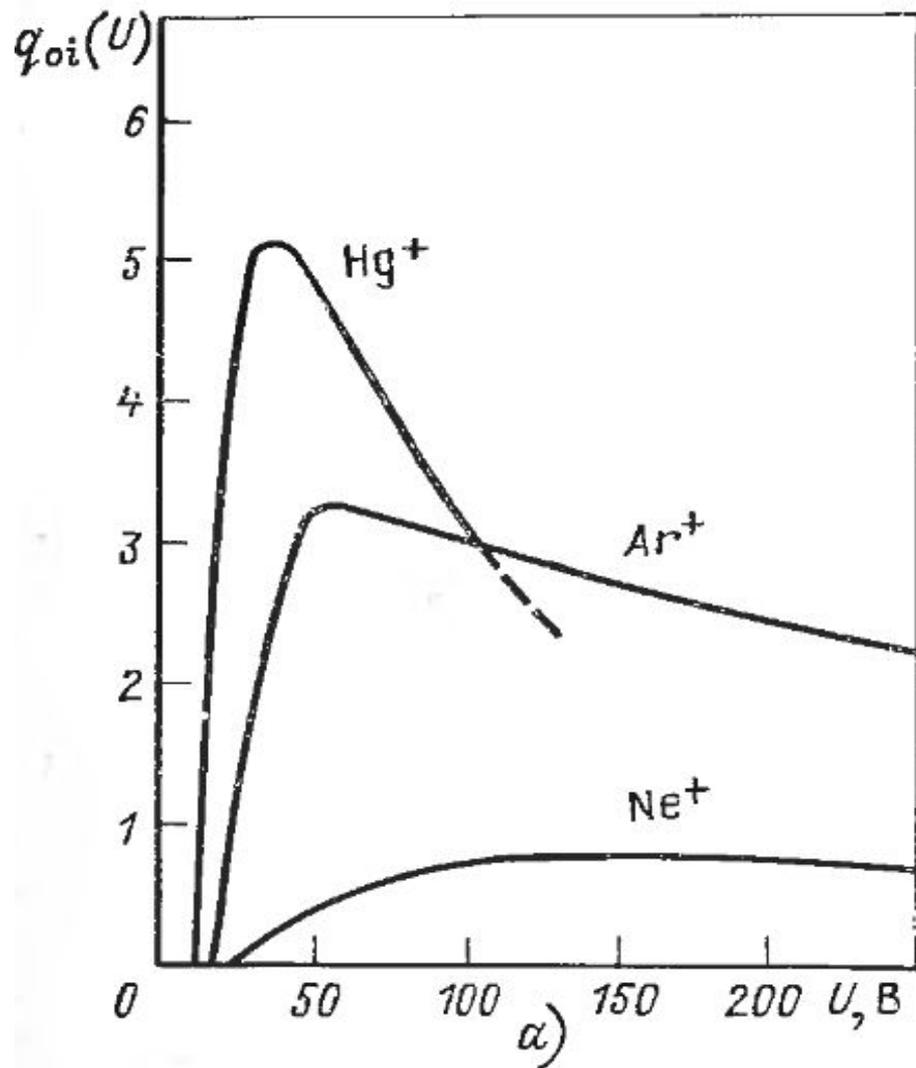


Рис. 2.10. Эффективные сечения некоторых атомов для прямой ионизации электронным ударом (а) и начальный участок для ртути (б)

Аппроксимации сечений прямой ионизации атома электроном

$$q_{oi} \approx a_{oi} (U - U_{oi}) \exp [-b(U - U_{oi})]$$

U_{oi} – потенциал ионизации (В),

U – энергия электрона (В)

a_{oi} и b – константы, зависящие от газа/пара

Для оценочных расчетов часто применяется

упрощенная аппроксимация:

$$q_{oi} \approx A (U - U_{oi}),$$

где A - угол наклона экспериментальной кривой,
зависящий от газа/пара.

Частота прямой ионизации

$Z_{ia} = q_{ia} N_a v_e$ – частота прямой ионизации атомов сорта a электроном со скоростью v_e

Подставив в правую часть уравнения:

-выражение для $q_{ia} = A (U - U_{oi})$,

- максвелловскую функцию распределения электронов по энергиям, f_{em}

-выразим скорость v_e через энергию $m_e v_e^2 / 2 = \varepsilon$

и проинтегрировав ее по энергиям электронов, получим выражение для частоты прямой ионизации атомов электронами с температурой T_e .

$$Z_{ia} = A N_a (6 \times 10^2 / \sqrt{\pi}) (2kT_e / m_e)^{3/2} (m_e / e) (1 + 0.5eU_i / kT_e) \exp(-eU_i / kT_e).$$

Частота ионизации возрастает с увеличением температуры электронов и уменьшается с увеличением потенциала ионизации

Эффект Пеннинга

Ионизация атома метастабилем с большей энергией возбуждения, чем энергия ионизации другого атома.

$$U_{\text{meth}}(\text{Ne}) > U_i(\text{Ar})$$

Возможна реакция:



Метастабильный атом неона возвращается в невозбужденное состояние, а выделившаяся энергия идет на ионизацию атома аргона и на энергию электрона

Перезарядка ионов с нейтральными частицами

Разные атомы: А и В.

Если потенциал ионизации атома А, $U_{i_A} > U_{i_B}$, то энергетически разрешается (возможен) процесс перезарядки:



Перезарядка не сопровождается превращениями энергии, то есть, изменениями внутренней энергии атомов (молекул), но лишь «превращением» частиц из иона в атом и наоборот

Объемная рекомбинация

Рекомбинация положительного иона с электроном.

1) с излучением



2) без излучения в тройном ударе:

a) со вторым электроном



b) с нейтральным атомом



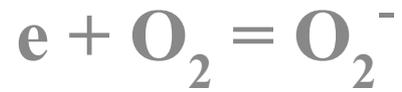
Диссоциация молекул **электронным ударом**

Если энергия “свободного”
электрона превышает
энергию связи йодида натрия,
то возможна реакция
диссоциации молекулы



Прилипание

Образование отрицательного иона в результате соударения электрона с атомом/молекулой



- 1) в электроотрицательных газах O_2 , F_2 , N_2 ;
- 2) при средних и высоких давлениях , $p > 1$ торр

II. Генерация спонтанного излучения.

Резонансное и нерезонансное излучение (Hg)

1. Резонансное УФ излучение



2. Нерезонансное УФ излучение



3. Нерезонансное видимое излучение



Спонтанное излучение: вероятности перехода

$A_{В-Н}$ – вероятность перехода с высокого на низкое энергетическое состояние

$\tau_{В}$ – средняя продолжительность жизни атома, возбужденного до уровня «В»

$$\tau_{В} = 1 / \sum A_{В-Н}$$

$$h\nu = W_{В} - W_{Н}$$

Нерезонансные возбужденные уровни: -

$$\tau_{В} \sim 10^{-7} - 10^{-6} \text{ с}$$

Резонансные возбужденные уровни:

$$\tau_{\text{Hg}} (6^1P_1) = 10^{-9} \text{ с}$$

$$\tau_{\text{Hg}} (6^3P_1) = 10^{-7} \text{ с}$$

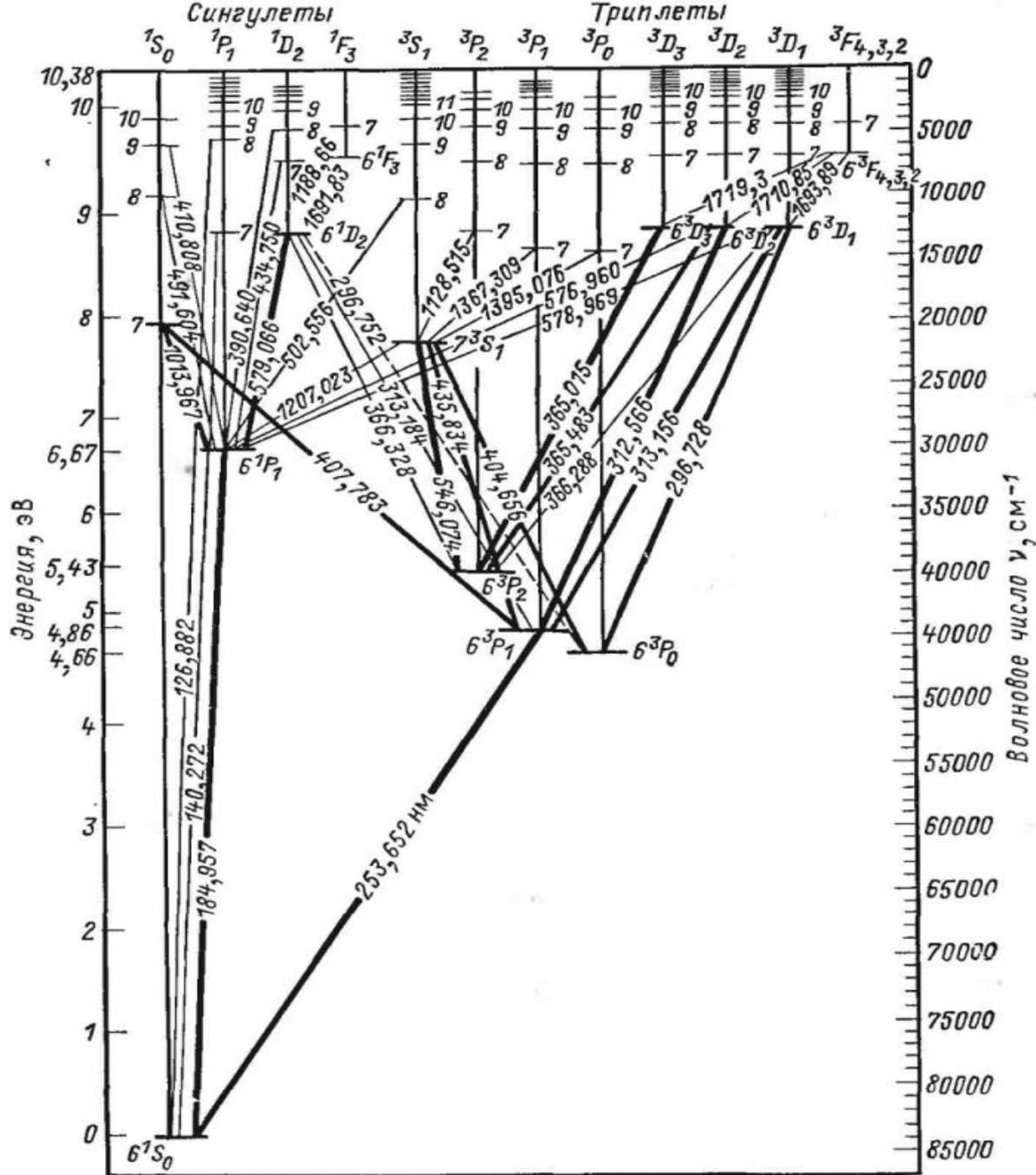


Рис. 2.3. Схема энергетических уровней атома ртути

III. *Взаимодействие излучения с атомами/молекулами*

$h\nu_{lk} + A_k = A_l$ - поглощение фотона атомом

(Напр. $h\nu_{10} + \text{Hg} (6^1S_0) = \text{Hg} (6^1P_1)$ – резонансный уровень)

$h\nu + A = A^+ + e$ – фотоионизация

$h\nu + AB = A + B$ – фотодиссоциация молекулы

$h\nu + A^- = A + e$ – разрушение отрицательного иона