***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.)

I. *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:

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

m_e – 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:

$$q_{eA} = \pi r^2_{эффA} \ [см^2]$$

Частота упругих столкновений:

$$\nu_{eA} = q_{eA} N_A v \ [1/c].$$

N_A – концентрация атомов сорта A

V – скорость электрона

средняя тепловая скорость электронов при Максвелловском распределении по скоростям:

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

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

– функция Максвелла

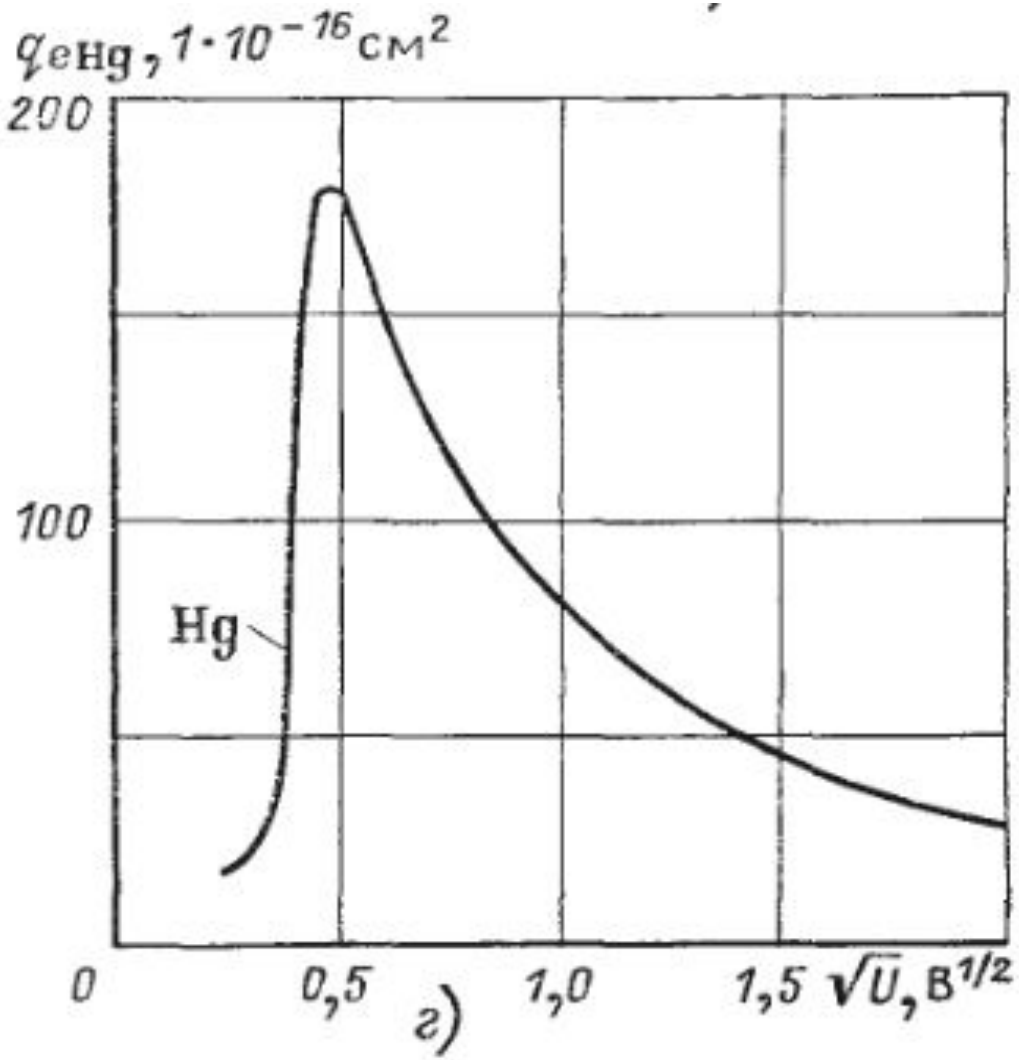
T_e – температура электронов, соответствующая их средней скорости $\langle v_m \rangle$

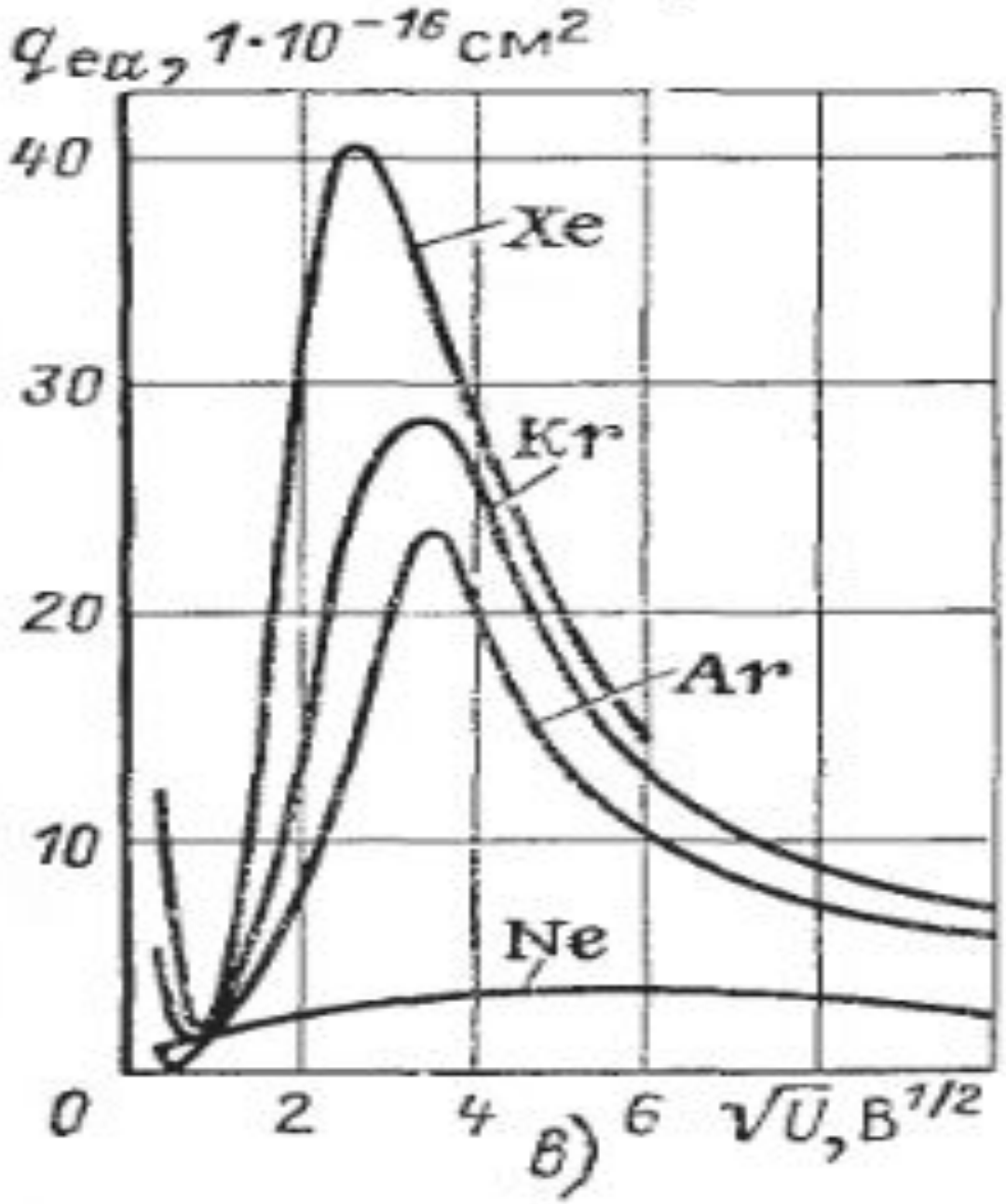
среднее время между столкновениями: $\tau = 1/\nu_{eA}$ [c]

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

В смеси газов: $\lambda_e = 1/\sum_i n_i q_i$ [см]

Сечение упругого соударения электрона с атомом ртути




$q_{e\alpha}$, $1 \cdot 10^{-16}$ см^2
40
30
20
10
0
2
4
6
$\sqrt{U}$, В$^{1/2}$
Xe
Kr
Ar
Ne
в)

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)

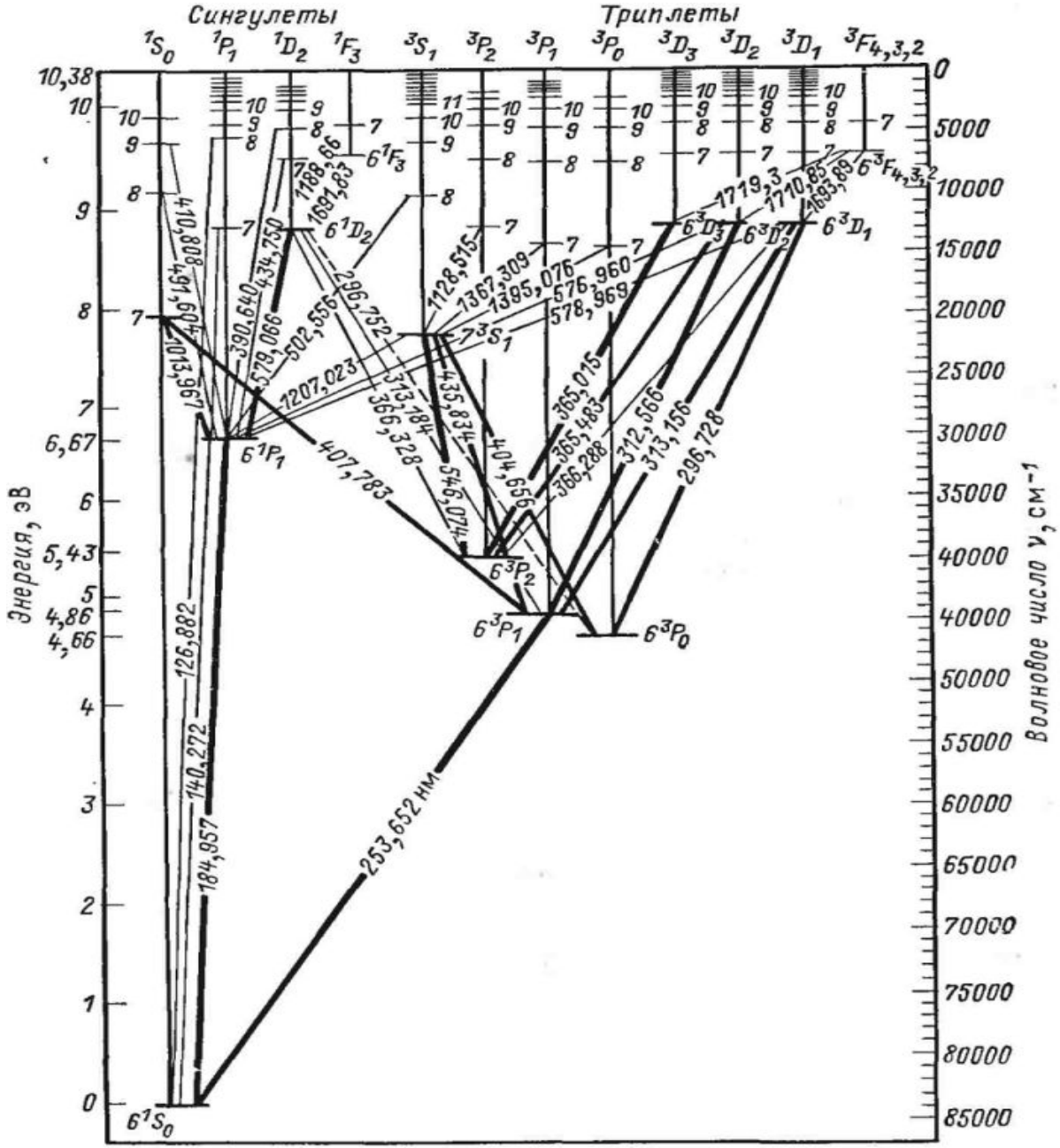


Рис. 2.3. Схема энергетических уровней атома ртути

Удары первого рода

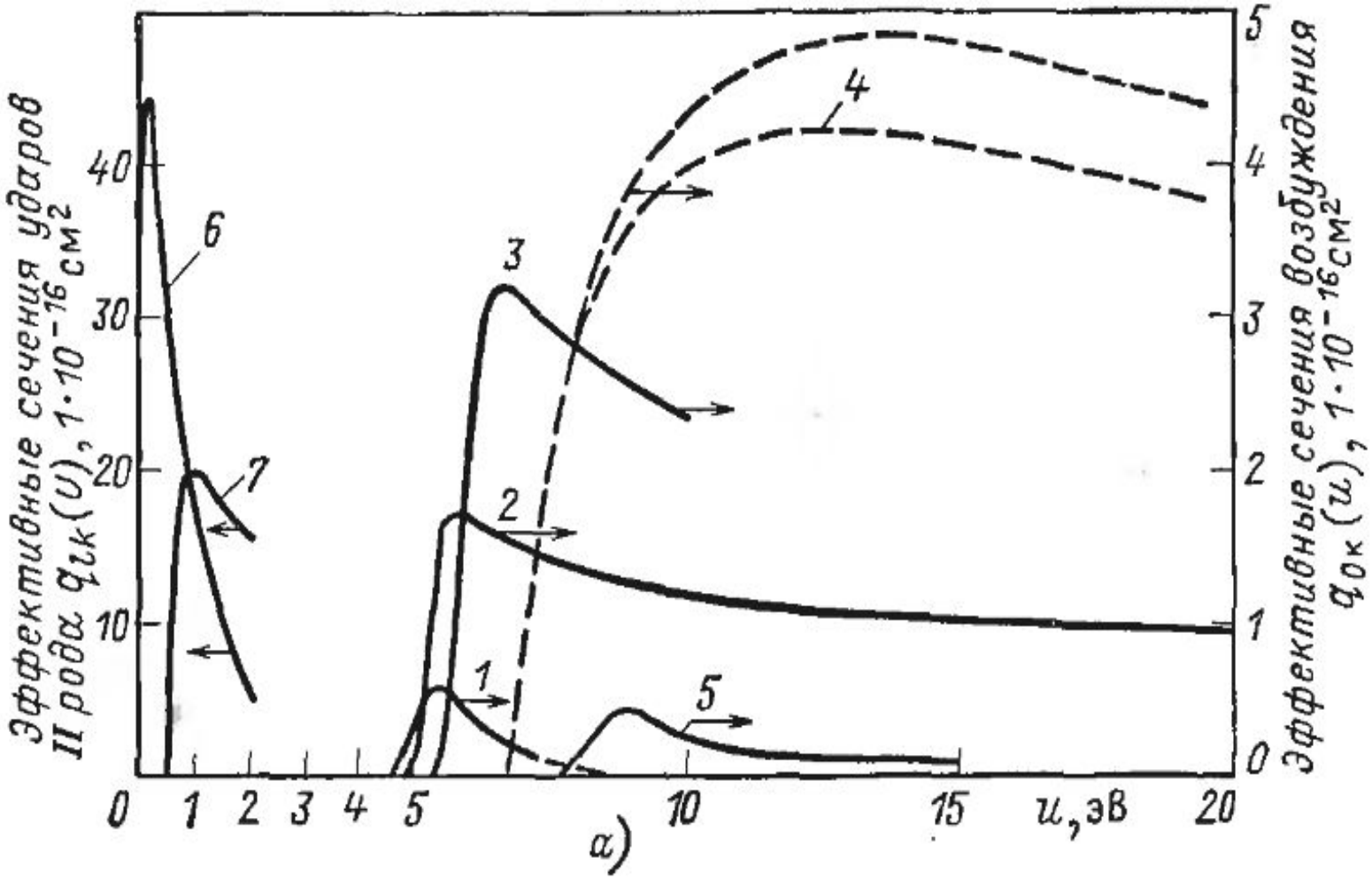
1. В результате соударения суммарная внутренняя энергия соударяющихся частиц возрастает

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

1) $Hg(6^1S_0) + e(5\ эВ) = Hg(6^3P_1) + e(0{,}14 эВ)$
2) $Hg(6^3P_0) + e(0{,}5\ эВ) = Hg(6^3P_1) + e(0{,}3 эВ)$

3) Кинетическая энергия атомов не изменяется!!

Сечения возбуждения атомов ртути электронами



Удары второго рода

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

а кинетическая энергия электрона – возрастает.

$$Hg(6^3P_1) + e(0{,}5\ эВ) = Hg(6^3P_0) + e(5{,}36 эВ)$$

$$Hg(6^3P_2) + e(0{,}5\ эВ) = Hg(6^3P_1) + e(1{,}07 эВ)$$

Кинетическая энергия атомов неизменна!!

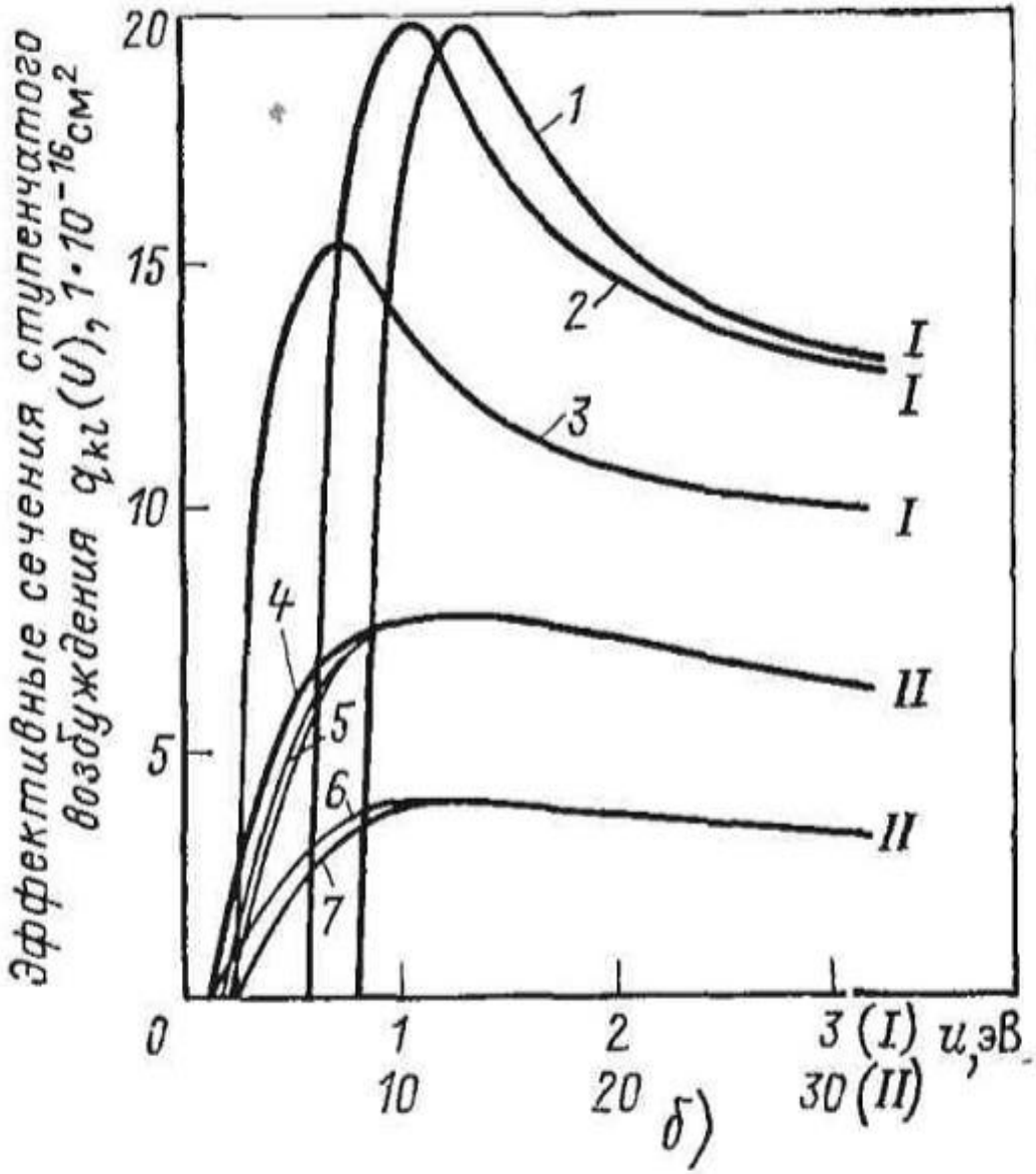


Рис. 2.9. Эффективные сечения возбуждения и ударов II рода атомов ртути электронами для некоторых наиболее важных переходов:

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

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

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

U – энергия электрона [В]

q_{klmax} – сечение соударения при **$U = U_{max}$**

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

*Таблица прямых и ступенчатых пере*ходов

Таблица 2.2

Элемент	Переход	Разность потенциалов, В	U_{max}, В	q_{Ikmax}, $1\cdot10^{-16}$ см²*
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

* $Q_{12} \approx 3{,}54\cdot10^{16}\ q_{12}$, см²/см³ [см. (2.8)].

Прямое и ступенчатое возбуждение

1) $Hg^0 + e_1(U_1) = Hg^k + e_1(U_2)$

$U_1 = U_B^k + U_2$

2) $Hg^k + e_2(U_3) = Hg^l + e_2(U_4)$

$U_3 = U_B^l - U_B^k + U_4$

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 см^3).

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 см^3):

$$z_{kl} = n_e N_k \int q_{kl}(v_e) v_e f_e(v_e) dv_e = n_e N_k \acute{\alpha}_{kl} \text{ [см}^3\text{/с]}$$

(интеграл от 0 до ∞),

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

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

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 ($\varepsilon_e = m_e v_e^2/2 = eU$):

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

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

1-го рода (возбуждение):

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

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

$$Hg^0 + e_1(U_1) = Hg^+ + e_1(U_2) + e_2(U_3)$$

$$U_1 = U_i + U_2 + U_3$$

U_i – потенциал ионизации

2. Ступенчатая ионизация

1) $Hg^0 + e_1(U_1) = Hg^k + e_1(U_2)$

$U_1 = U_k + U_2$ U_k – потенциал возбуждения

2) $Hg^k + e_2(U_1) = Hg^+ + e_2(U_2) + e_3(U_3)$

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

U_i – потенциал ионизации

Кинетические энергии атомов не изменяются!!

Сечения прямой ионизации

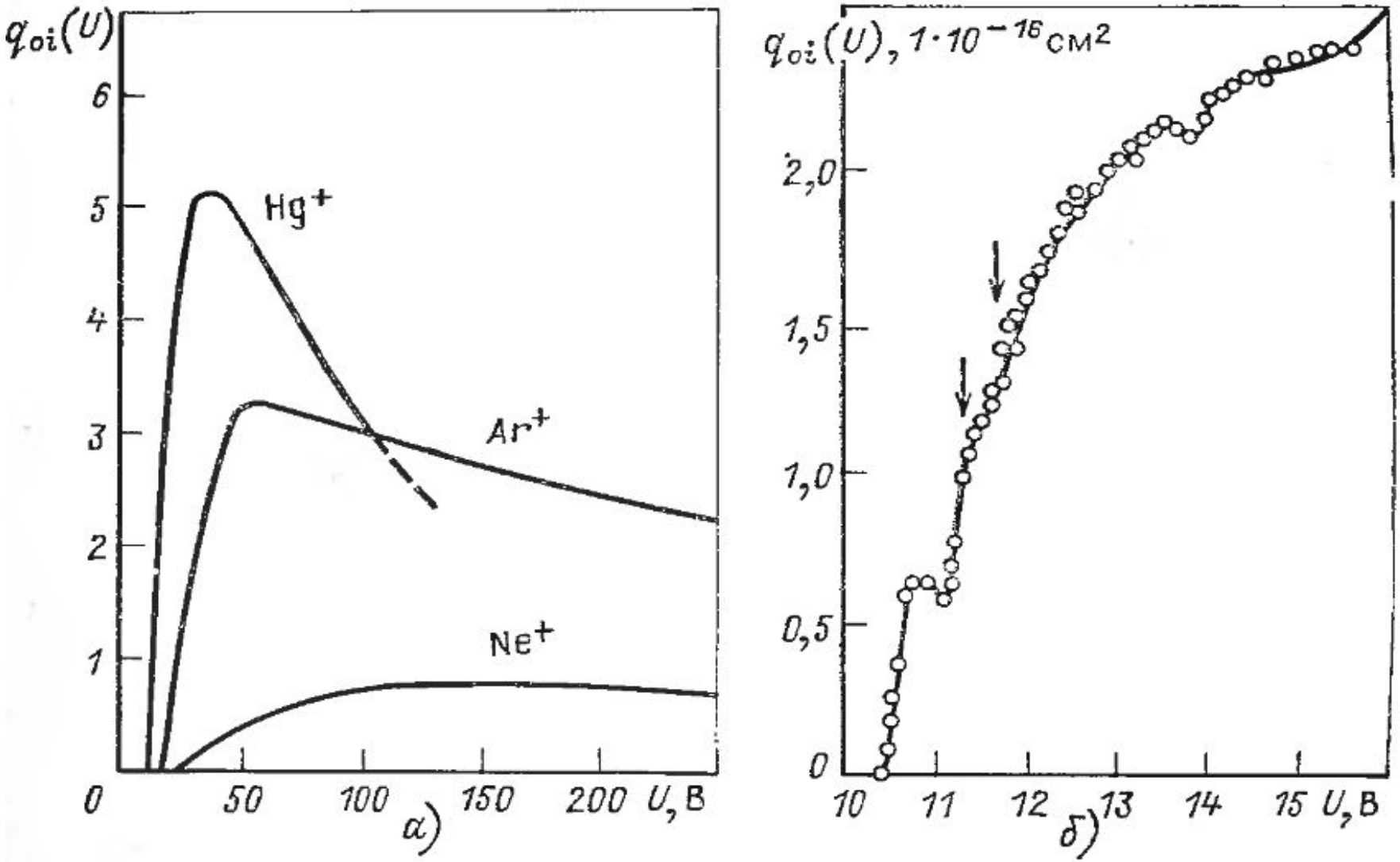


Рис. 2.10. Эффективные сечения некоторых атомов для прямой ионизации электронным ударом (*а*) и начальный участок для ртути (*б*)

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 Te.

$$z_{ia} = AN_a (6x10^2/\sqrt{\pi}) (2kTe/m_e)^{3/2} (m_e/e)(1 + 0.5eU_i/kTe)\exp(-eU_i/kTe).$$

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.

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

Возможна реакция:

$$Ne^* + Ar = Ne + Ar^+ + e$$

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:

$$A^+ + B = A + B^+$$

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

$$M^+ + e = M + h\nu ,$$

2) без излучения в тройном ударе:

a) со вторым электроном

$$M^+ + e_1 + e_2 = M + e_2$$

b) с нейтральным атомом

$$M^+ + e + N = M + N$$

Диссоциация молекул электронным ударом

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

$$e + NaI = e + Na + I$$

Прилипание

Образование отрицательного иона в результате соударения электрона с атомом/молекулой

$$e + O_2 = O_2^-$$

1) **в электроотрицательных газах O_2, F_2, H_2;**
2) **при средних и высоких давлениях , $p > 1$ торр**

II. *Генерация спонтанного излучения. Резонансное и нерезонансное излучение (Hg)*

1. Резонансное УФ излучение

$Hg\ (6^3P_1) \rightarrow Hg\ (6^1S_0) + h\nu\ (254\ nm)$

$Hg\ (6^1P_1) \rightarrow Hg\ (6^1S_0) + h\nu\ (185\ nm)$

2. Нерезонансное УФ излучение

$Hg\ (6^3D_3) \rightarrow Hg\ (6^3P_2) + h\nu\ (365\ nm)$

$Hg\ (6^3D_2) \rightarrow Hg\ (6^3P_1) + h\nu\ (312\ nm)$

$Hg\ (6^3D_1) \rightarrow Hg\ (6^3P_0) + h\nu\ (297\ nm)$

3. Нерезонансное видимое излучение

$Hg\ (7^3S_1) \rightarrow Hg\ (6^3P_2) + h\nu\ (546\ nm)$

$Hg\ (7^3S_1) \rightarrow Hg\ (6^3P_1) + h\nu\ (436\ nm)$

$Hg\ (7^3S_1) \rightarrow Hg\ (6^3P_0) + h\nu\ (405\ nm)$

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»

$$\tau_в = 1/\Sigma A_{в-н}$$

$$h\nu = W_в - W_н$$

Нерезонансные возбужденные уровни: -

$$\tau_в \sim 10^{-7} - 10^{-6}\ с$$

Резонансные возбужденные уровни:

$$\tau_{Hg}\ (6^1P_1) = 10^{-9}\ с$$

$$\tau_{Hg}\ (6^3P_1) = 10^{-7}\ с$$

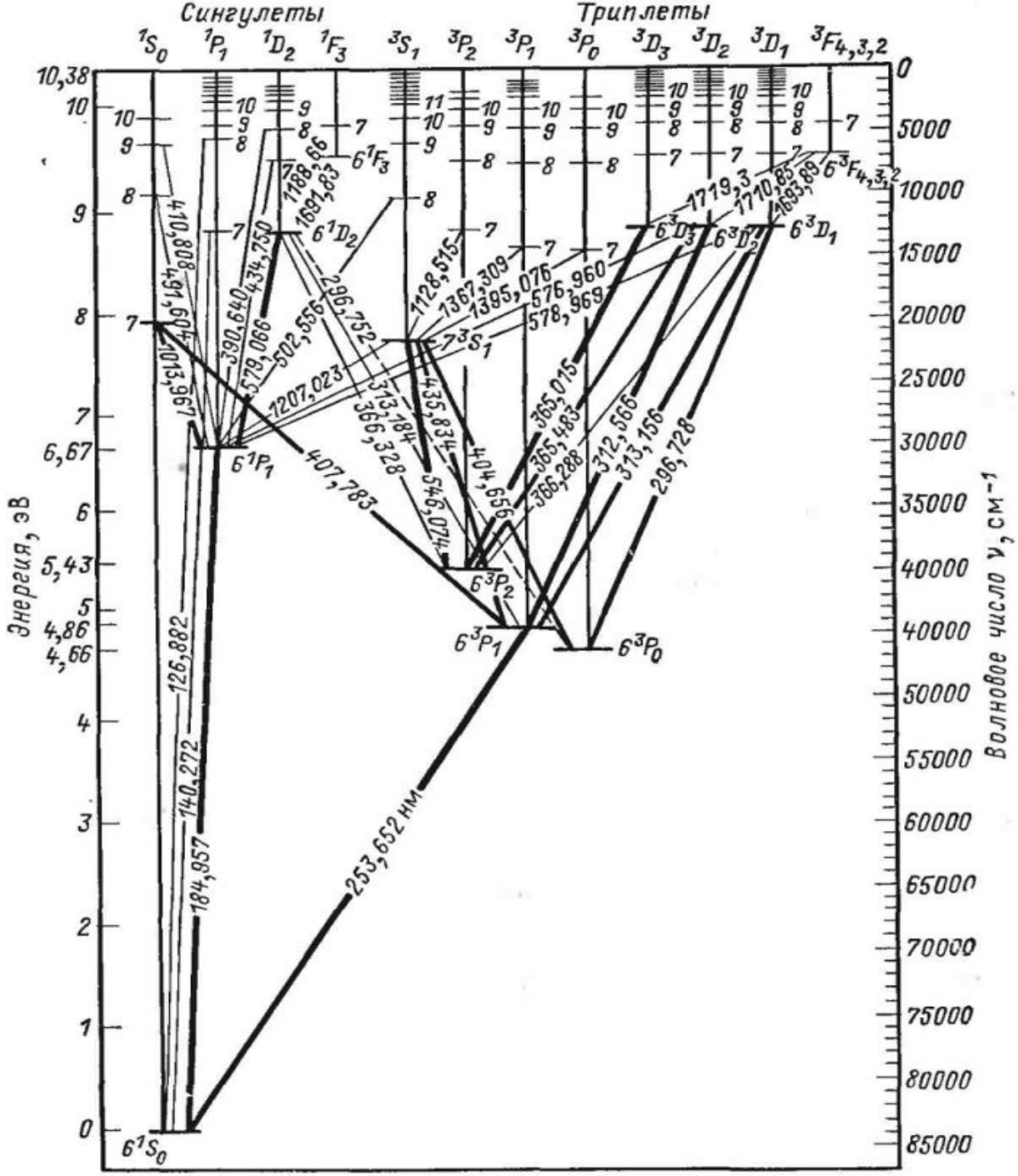


Рис. 2.3. Схема энергетических уровней атома ртути

III. ***<u>Взаимодействие излучения с атомами/молекулами</u>***

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

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

$h\nu + A = A^+ + e$ – фотоионизация

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

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