

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

8

Г.Г.ПЕТРАШ, С.В.МАРКОВА, К.И.ЗЕМСКОВ

**ВОЗМОЖНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА НА ИОН-ИОННОЙ
РЕКОМБИНАЦИИ.**

**II. РЕКОМБИНАЦИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ
ИОНОМ КИСЛОРОДА**

МОСКВА 2005

Аннотация

На основе предложенного ранее механизма создания импульсной инверсии в процессе ион-ионной рекомбинации рассмотрены возможные пары положительных ионов металлов и отрицательного иона кислорода. Приводится анализ положения наиболее заселяемого в данном процессе уровня атома металла. Анализ иллюстрируется схемами уровней и наиболее вероятными переходами для 10 атомов металлов.

Summary

Possible couples of the positive metal ions and the oxygen negative ion to realization of the ion-ion recombination mechanism of the pulsed inversion population are discussed. The metal atoms energy levels most populated in this process are estimated. The energy levels diagrams with the most probable transitions for 10 metal atoms are presented.

Введение.

В нашей недавней работе [1] рассмотрена идеализированная схема образования импульсной инверсии в процессе ион-ионной рекомбинации. Там же сделаны оценки скоростей основных процессов, определяющих образование инверсии, приведены аргументы в пользу импульсного режима и сделан вывод о том, что в случае, если удастся приблизиться к описанным идеализированным условиям образования инверсии, можно будет осуществить импульсную генерацию большой мощности и с высокой эффективностью. Рассмотренный механизм образования инверсии предполагает также возможность реализации инверсии и генерации на переходах, оканчивающихся на основном состоянии атомов, что может представлять особый интерес для ряда применений. В [1] отмечалось, что возможность приблизиться к идеализированной схеме образования инверсии зависит от того, насколько удастся найти такую пару положительных и отрицательных ионов и такие условия их образования, которые достаточно хорошо соответствовали бы описанным условиям осуществления идеального механизма импульсной инверсии в процессе ион-ионной рекомбинации.

В наших работах [2,3] рассмотрены возможные пары для рекомбинации с отрицательными ионами галогенов. Оказалось, что приблизиться к идеальной схеме получения инверсии в процессе ион-ионной рекомбинации, используя отрицательные ионы галогенов, довольно трудно. Основная причина трудностей состоит в том, что сродство к электрону для атомов галогенов весьма велико. Оно больше, чем для других атомов. Это означает, что в этом случае энергия наиболее заселяемого уровня $E_r = E_i - E_c$ соответствует уровню, расположенному намного ниже потенциала ионизации.

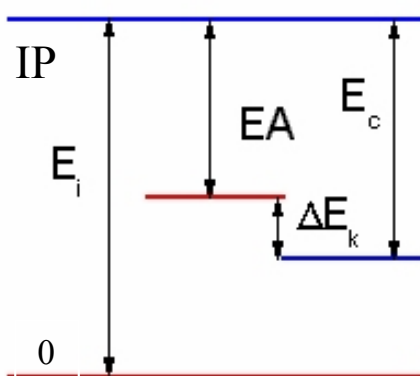


Рис.1. Схема для расчета ii-резонансов

Это сразу ограничивает выбор атомов для реализации рассматриваемого механизма инверсии атомами с не слишком низким потенциалом ионизации. Среди рассмотренных в [2,3] систем, пригодных для реализации лазера на ион-

ионной рекомбинации, наибольший интерес представляют такие, в которых предполагается осуществление инверсии на переходах в основное состояние атома. Реализация лазеров на таких переходах представляет особый интерес, однако она связана и с наибольшими трудностями. В связи со сказанным необходим дальнейший поиск возможных пар ионов для реализации рассматриваемого механизма инверсии.

В этой работе мы несколько расширим поиск пар ионов. Мы не будем ограничиваться только случаями, наиболее пригодными для прямой реализации упомянутого выше механизма инверсии, а будем искать все пары ионов, которые могут обеспечить хорошее заселение какого-либо уровня атома в процессе ион-ионной рекомбинации. В этом случае можно рассматривать непрямые механизмы образования инверсии, например, с помощью столкновительной передачи энергии на какой-то другой уровень того же или другого атома, а также возможности реализации эффективных источников некогерентного излучения.

В настоящей работе рассматриваются возможные пары для рекомбинации с отрицательными ионами кислорода. Средство к электрону EA для атома кислорода, взятое из [4]:

$$EA(O) = 1,46112 \text{ эВ} = 11785 \text{ см}^{-1}$$

Положение наиболее заселяемых при ион-ионной рекомбинации уровней (ii-резонансы), как и в предыдущих наших работах, определялось с помощью графиков, приведенных в работе [5]. Эти графики (см. также в [2,3]) отражают зависимости E_c – потенциала ионизации с наиболее заселяемого при ион-ионной рекомбинации уровня от величины средства к электрону EA и приведенной массы μ . Величины E_c , полученные таким способом, приведены в таблице 1 для двух значений приведенной массы сталкивающихся ионов $\mu=10$ и $\mu=25$. В большинстве случаев приведенные массы попадают в этот интервал или не сильно выходят за его пределы. Поскольку графики получены на основе приближенных формул, а ii-резонансы по имеющимся данным имеют ширину $\sim 0,3 - 0,4$ эВ, использование этих значений μ в большинстве рассматриваемых здесь случаев достаточно для оценок положения ii-резонансов.

Таблица 1.

Ион	$E_c, \text{ см}^{-1},$ $\mu=10$	$E_c, \text{ см}^{-1},$ $\mu=25$
O ⁻	24520	23551

С использованием указанных графиков и данных о положениях уровней атомов из [6] был проведен анализ положения наиболее заселяемого в процессе ион-ионной рекомбинации уровня для многих атомов, представленных в [6]. Результаты этого анализа для случаев, представляющих, по нашему мнению, наибольший интерес, представлены ниже на рисунках в виде частичных схем уровней и переходов. На этих схемах величина E_0 обозначает энергию уровня, который был бы в точном ii -резонансе, отсчитанную от основного состояния атома. На рисунках положение ii -резонансов показано штриховой или штрих-пунктирной линией. На рисунках указываются также разница энергии рассматриваемого уровня и уровня, соответствующего ii -резонансу $\Delta E = E_j - E_0$, где E_j – энергия рассматриваемого уровня. Стрелками показаны также возможные переходы с уровней, находящихся в хорошем резонансе. Длины волн указаны в ангстремах, в скобках приведены вероятности переходов A_{ij} в s^{-1} или силы осцилляторов. Данные взяты, в основном, из [6]. Иногда длины волн на рисунках были просто рассчитаны по энергиям соответствующих термов, такие данные снабжены пометкой «расч.» В некоторых случаях, чтобы не усложнять рисунки, возможные переходы с наиболее заселяемых в процессе ион-ионной рекомбинации уровней представлены в таблицах.

Рекомбинация с отрицательным ионом кислорода O^- .

Щелочно-земельные элементы.

На рис. 2 приводится схема уровней для атома бериллия. В резонансе находится только один уровень $BeI\ 2s3s\ ^3S_1$. Для него $\Delta E = 1407\ cm^{-1} = 0.174\ эВ$. С этого уровня возможны три хорошо разрешенных перехода на уровни $^3P^o_{0,1,2}$, соответствующие линиям в УФ области спектра. Вероятности этих переходов велики, так что осуществление прямого механизма инверсии затруднено [1]. Однако можно рассчитывать на создание эффективного нелазерного источника УФ излучения.

На рис. 3 приведена схема уровней для атома магния. Как видно из рисунка, близко к резонансу расположен уровень $3s3p\ ^1P^o_1$. Резонанс для него несколько хуже, $\Delta E = -2100\ cm^{-1} = -0.260\ эВ$. Возможен только один резонансный переход в основное состояние. Вероятность перехода $A_{ij} = 5 \cdot 10^8\ c^{-1}$, $\lambda = 2852.1251\ \text{Å}$. Здесь тоже можно рассчитывать на создание эффективного нелазерного источника УФ излучения.

Ситуация с ii -резонансом для атома кальция показана на рис. 4. Здесь также близок к резонансу первый резонансный уровень $4s4p\ ^1P^o_1$, $\Delta E = -868\ cm^{-1} = -0.108\ эВ$. Соответственно, возможен резонансный переход в основное состояние, $\lambda = 4226.727\ \text{Å}$, $A_{ij} = 2.20 \cdot 10^8\ c^{-1}$. Но для кальция возможны также

R-М переходы на уровни $3d4s\ ^1D_2$, $\ ^3D_j$. На переходе на $3d4s\ ^1D_2$ уровень получена генерация ($\lambda = 5,547$ мкм), в том числе и в непрерывном режиме.

Похожая ситуация и для атома стронция. Схема уровней и переходов для SrI дана на рис. 5. В хорошем ii-резонансе находится первый резонансный уровень SrI $5s5p\ ^1P^o_1$, $\Delta E = 286.5\ \text{cm}^{-1} = 0.0355$ эВ. С него возможен сильный резонансный переход в основное состояние, и переходы на уровень $5s4d\ ^1D_2$ (хорошо известный R-М переход $\lambda = 6,457$ мкм) и на уровни $5s4d\ ^3D_{1,2}$ ($\ ^1P^o_1 - \ ^3D_2\ \lambda = 2,871$ мкм). В свою очередь, с уровня $5s4d\ ^1D_2$ есть переход на уровень $5s5p\ ^3P^o_1\ \lambda = 1,7709$ мкм. На всех этих линиях наблюдалась генерация.

Схема уровней и переходов для атома бария приведена на рис. 6. Здесь также в резонансе находится первый резонансный уровень $6s6p\ ^1P^o_1$, $\Delta E = 544\ \text{cm}^{-1} = 0.067$ эВ. С него возможны: переход в основное состояние ($\lambda = 5535.481\ \text{A}$, $A = 1.19 \cdot 10^8\ \text{c}^{-1}$) и R-М переходы на уровень $6s5d\ ^1D_2$ ($\lambda = 1.500$ мкм $A = 2,5 \cdot 10^5\ \text{c}^{-1}$) и на уровень $6s5d\ ^3D_2$ ($\lambda = 1.130$ мкм).

На обоих этих переходах получена довольно интенсивная самоограниченная генерация.

Для осуществления генерации на R-М переходах CaI, SrI и BaI режим возбуждения должен отличаться от режима возбуждения для лазера на ион-ионной рекомбинации, рассмотренного в [1]. Для CaI и SrI ионизация атомов в импульсе возбуждения не должна быть близкой к полной. Желательно, чтобы к концу импульса возбуждения на основном состоянии атома оставалась настолько значительная населенность, чтобы имело место пленение излучения на резонансном переходе. В этом случае генерация на R-М переходах может быть эффективной. Если же в импульсе возбуждения ионизация будет близка к полной, то резонансный уровень будет преимущественно распадаться спонтанным излучением в основное состояние. Возможна и промежуточная ситуация - вначале заселяется основное состояние, а когда его населенность достигнет уровня, приводящего к пленению излучения, возникнет генерация на R-М переходах.

Подобная ситуация будет иметь место для всех атомов, для которых при ион-ионной рекомбинации заселяется резонансный уровень и имеются R-М переходы.

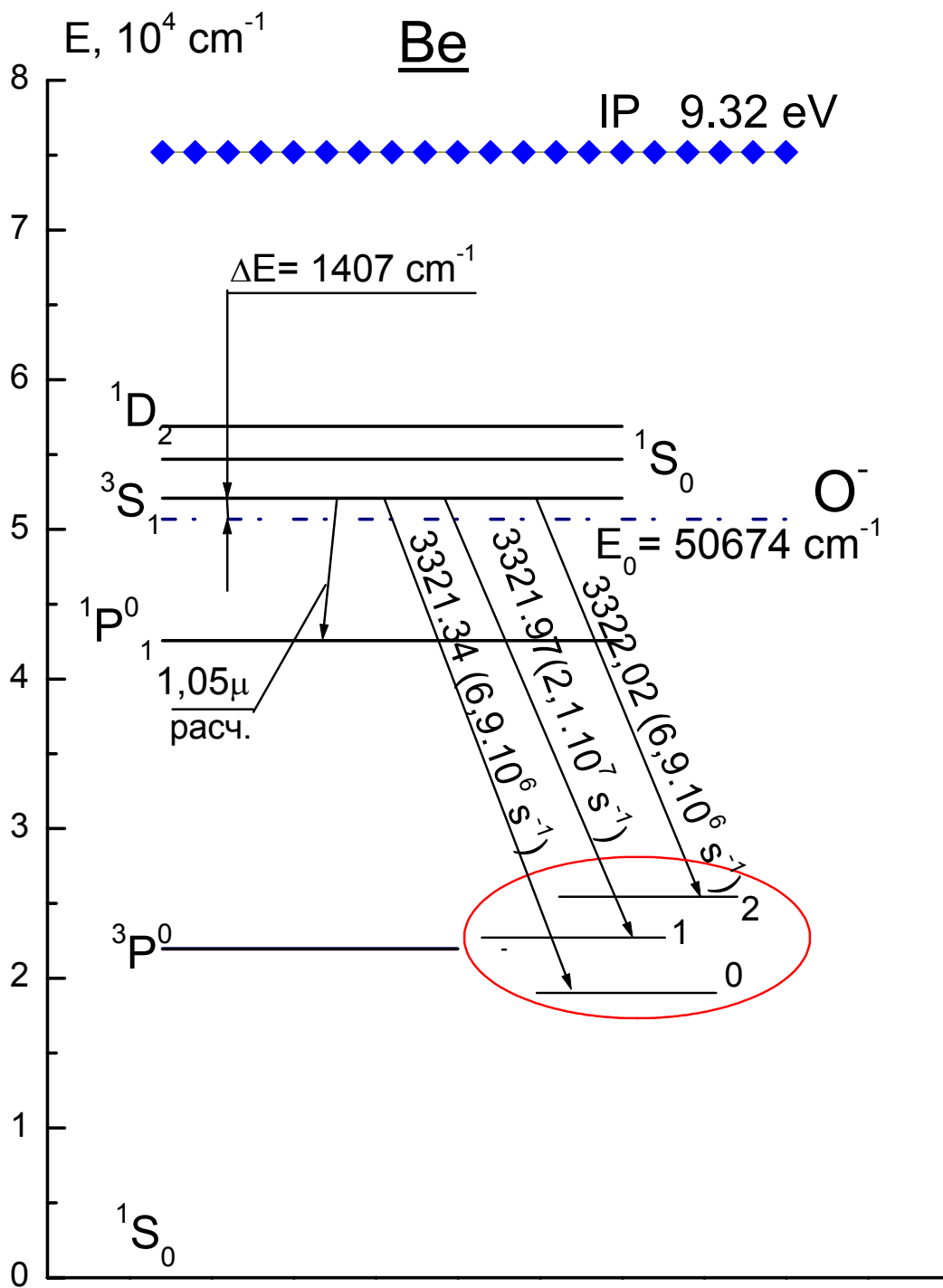


Рис.2. Схема уровней и переходов в атоме бериллия

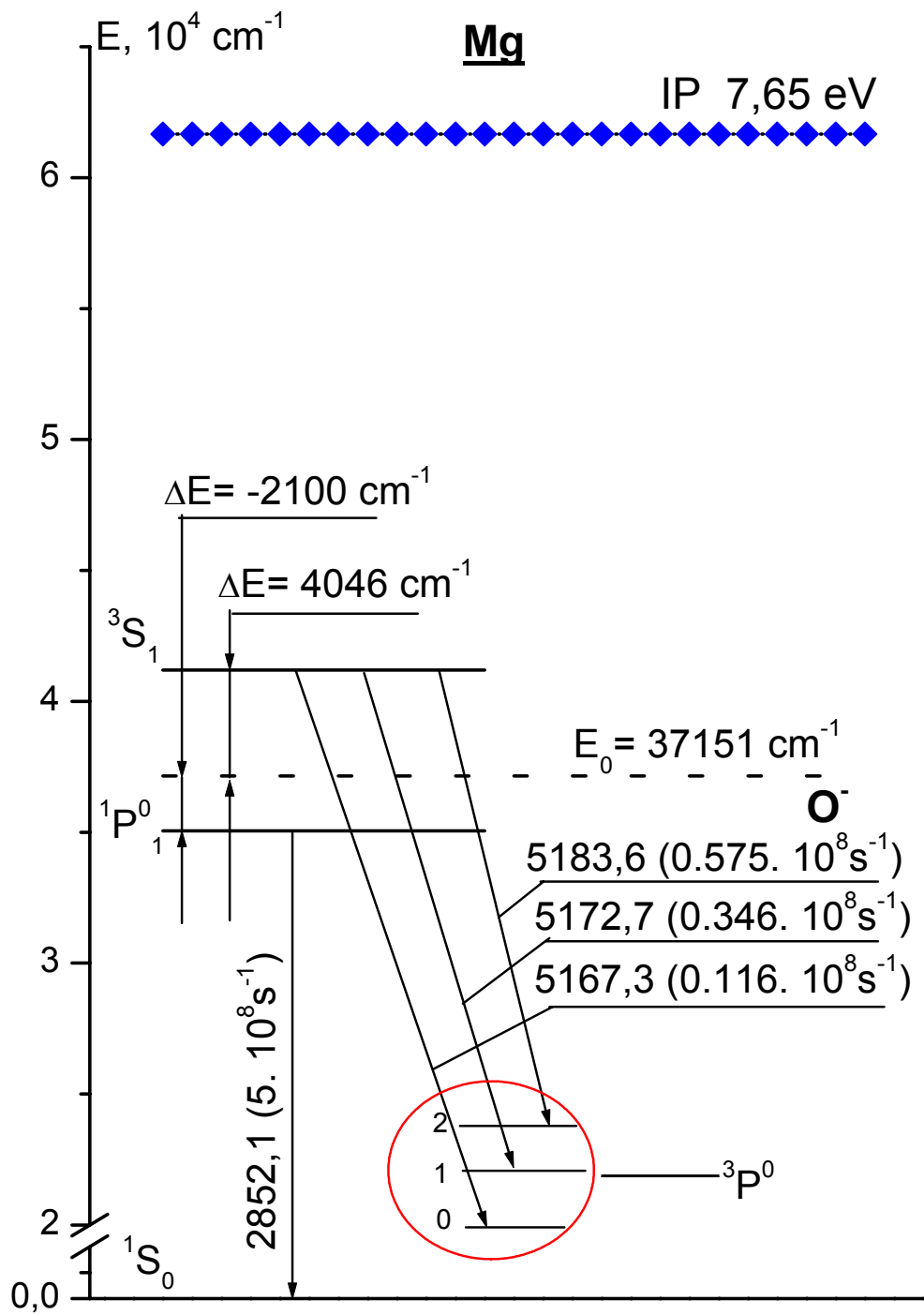


Рис.3. Схема уровней и переходов в атоме магния

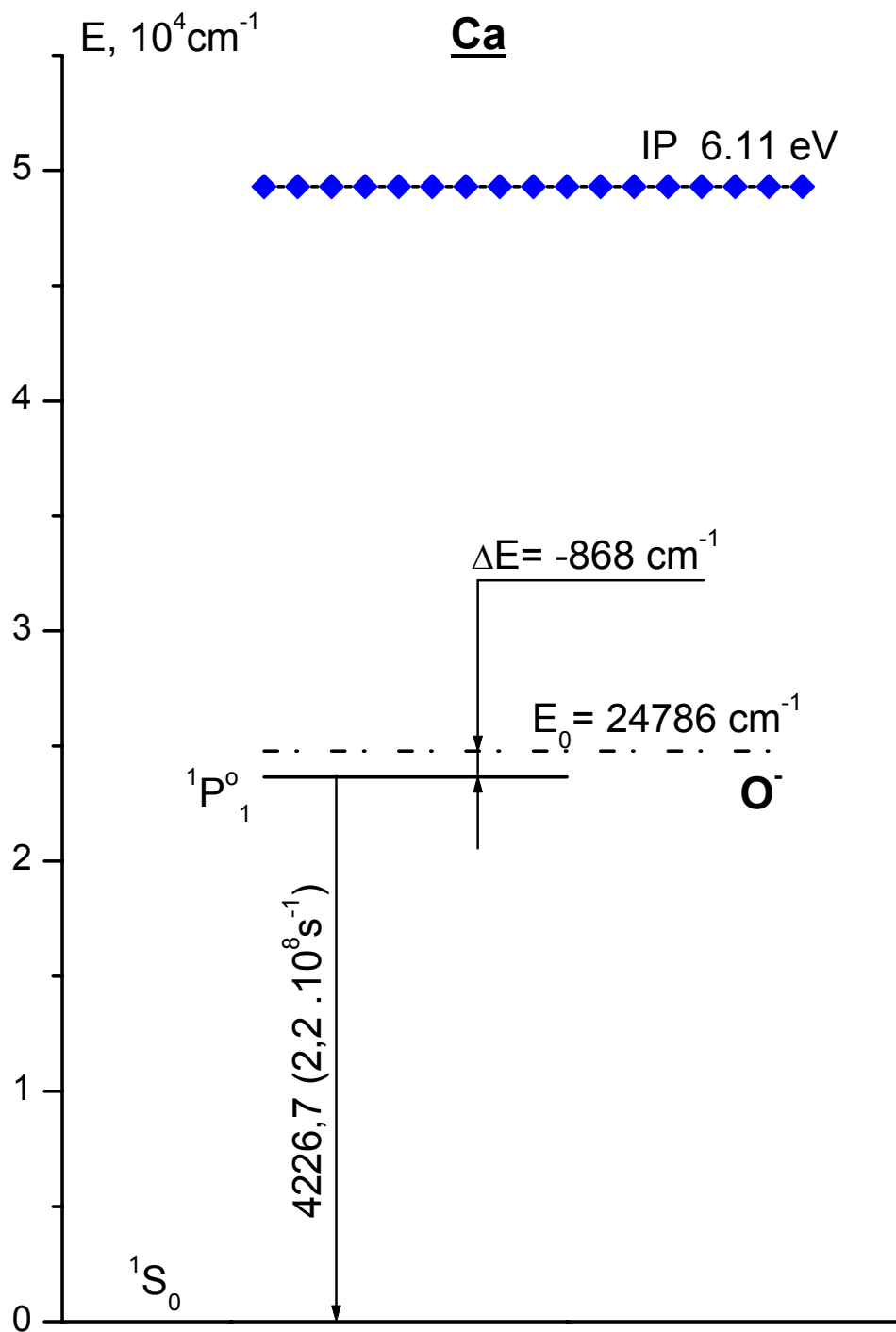


Рис.4. Схема уровней и переходов в атоме кальция.

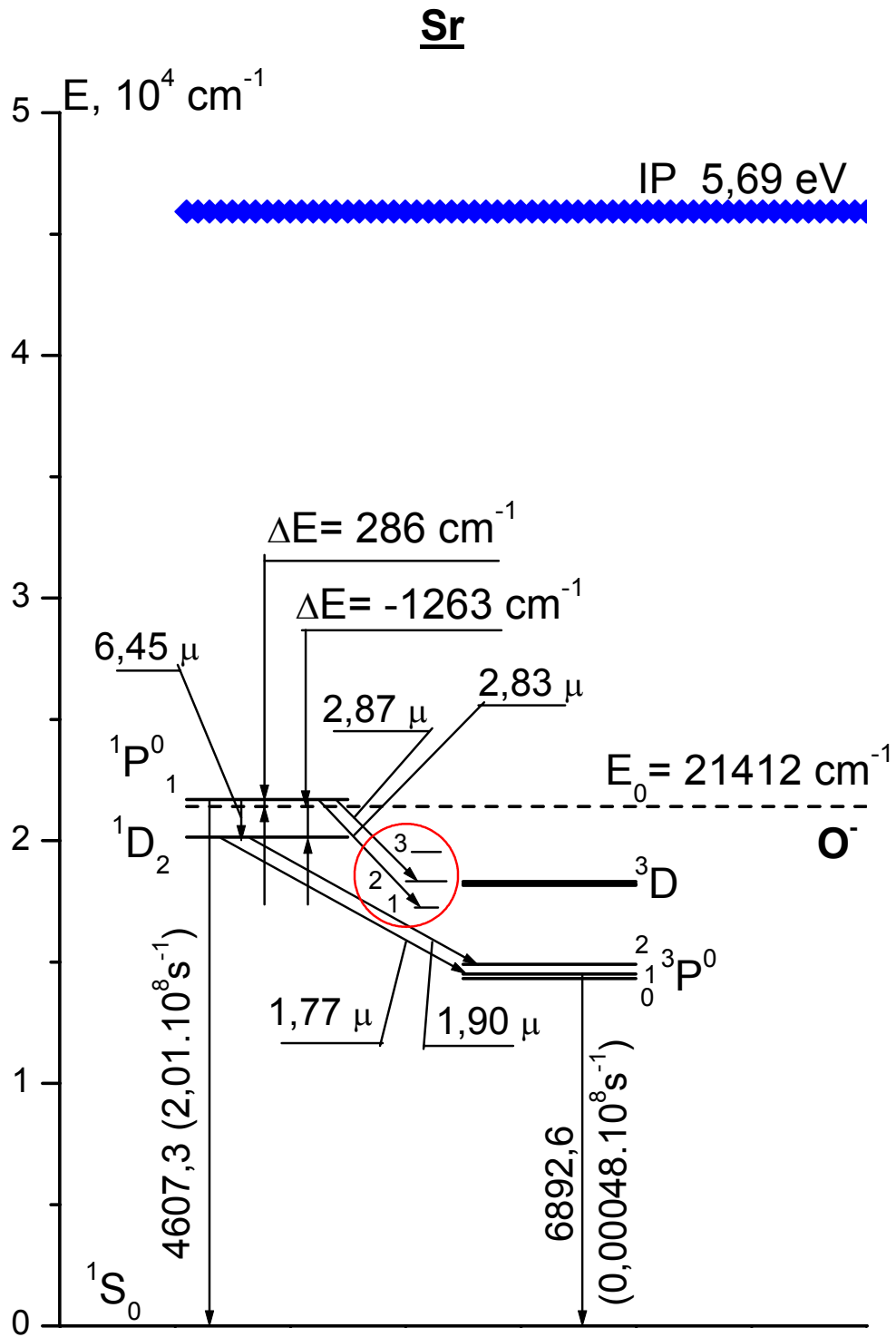


Рис.5. Схема уровней и переходов в атоме стронция

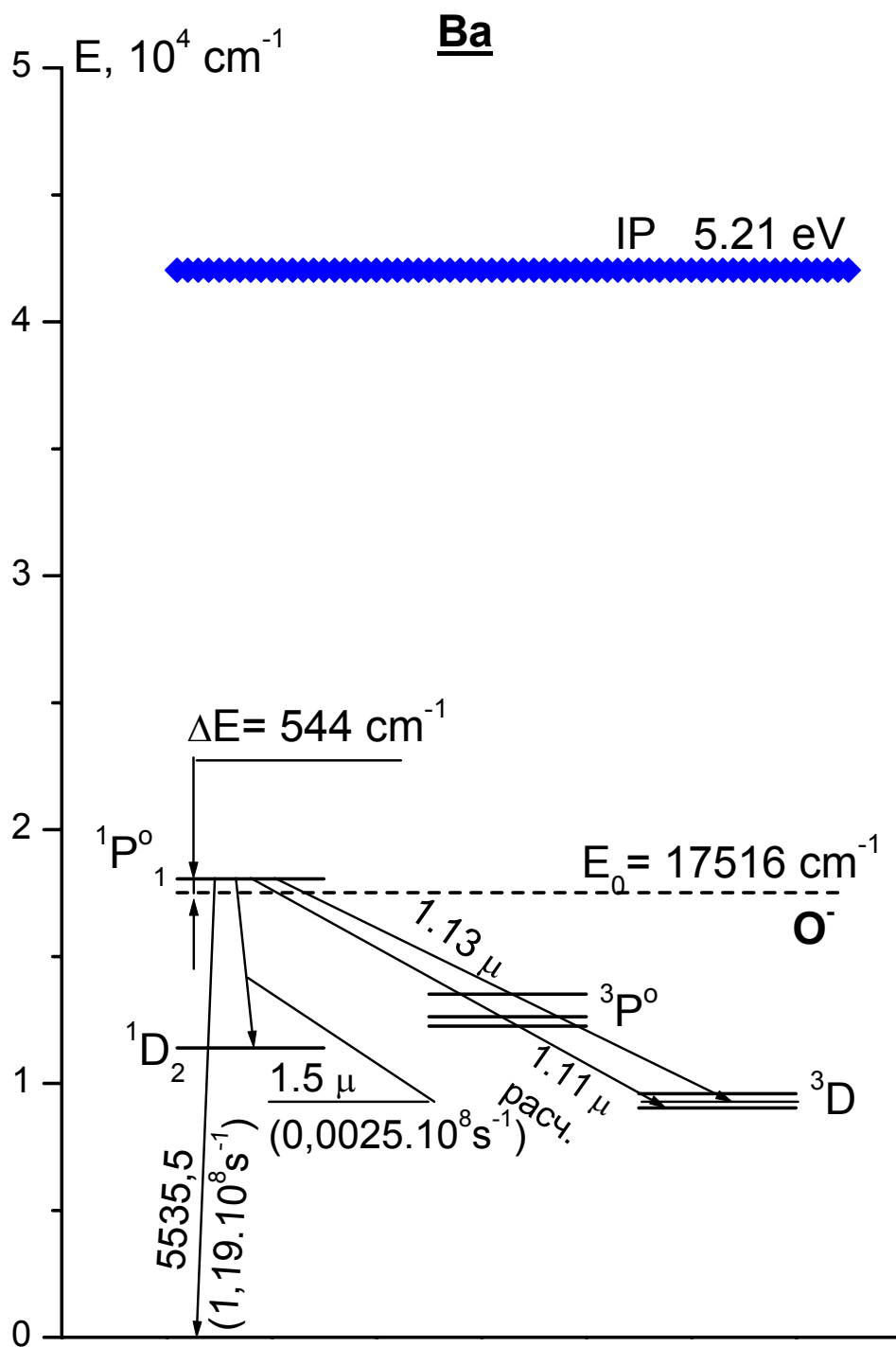


Рис.6. Схема уровней и переходов в атоме бария

Zn, Cd и Hg.

Для этих атомов ближе всего к резонансу уровни $ns(n+1)s^3S_1$. Для Zn и Hg $\Delta E \approx 0,3$ эВ, для Cd, рекомбинация положительного иона которого с отрицательными ионами галогенов исследуется в настоящее время экспериментально, ситуация хуже - $\Delta E \approx 0,43$ эВ, поэтому в данной работе мы не рассматриваем кадмий, как возможную пару в процессе ион-ионной рекомбинации с ионом кислорода для создания инверсии. Схемы уровней для цинка и ртути приведены на рисунках 7, 8. Возможны три перехода на уровни $nsnp^3P^0_{0,1,2}$ (в частности, хорошо известный видимый триплет ртути). Вероятности переходов велики для эффективной реализации рассмотренного в [1] механизма инверсии.

Sn

Хороший ii -резонанс имеется для уровней $6p5s^3P^0_{0,1}$ атома олова; ΔE равняется -72 и 201 см^{-1} . С этих уровней возможны переходы в основное состояние и на несколько метастабильных уровней (см. рис. 9). Вероятности переходов и здесь великоваты. Вероятность перехода на уровень $6p^2^1S_0$ найти пока не удалось.

Sc и Sm

Как и для ii -рекомбинации с отрицательными ионами галогенов, значительное число ii -резонансов имеется для атомов со сложной структурой уровней. В этом случае, как правило, в резонанс попадает несколько уровней, и с них возможны довольно много переходов вниз. В целом, ситуация для этих атомов существенно более сложная. Здесь мы в качестве примера рассмотрим ситуацию для атомов скандия и самария.

Упрощенная схема уровней и переходов в атоме скандия приводится на рисунке 10. Чтобы не перегружать рисунок, на нем приведены не все возможные переходы. Ближе к резонансу расположены уровни $3d^24p^4G^0_J$.

Возможные переходы с этих уровней на уровни $3d^24s^4F_j$ приводятся в таблице 2. Там же приведены возможные переходы на уровни основной конфигурации с уровнями $4s4p^2P^0_j$, расположенных дальше от резонанса.

Еще более сложная система уровней у атома самария. Соответствующая упрощенная схема уровней и переходов приводится на рисунке 11. Многочисленные возможные переходы приведены в таблице 3, особенность ситуации для самария состоит в том, что уровни конфигураций, с которых и на которые возможны переходы, расположены довольно тесно. Можно ожидать, что в условиях работы предполагаемого лазера, в пределах каждой из рассматриваемых конфигураций распределение населенностей по уровням в процессе столкновений тяжелых частиц будет приближаться к равновесному с

температурой газа. Кроме того, возможна конкуренция между переходами, начинающимися на одном и том же уровне или оканчивающимися на одном уровне. Все это усложняет ситуацию. Не исключено, что генерацию в процессе ион-ионной рекомбинации можно будет ожидать только на некоторых из рассматриваемых линий.

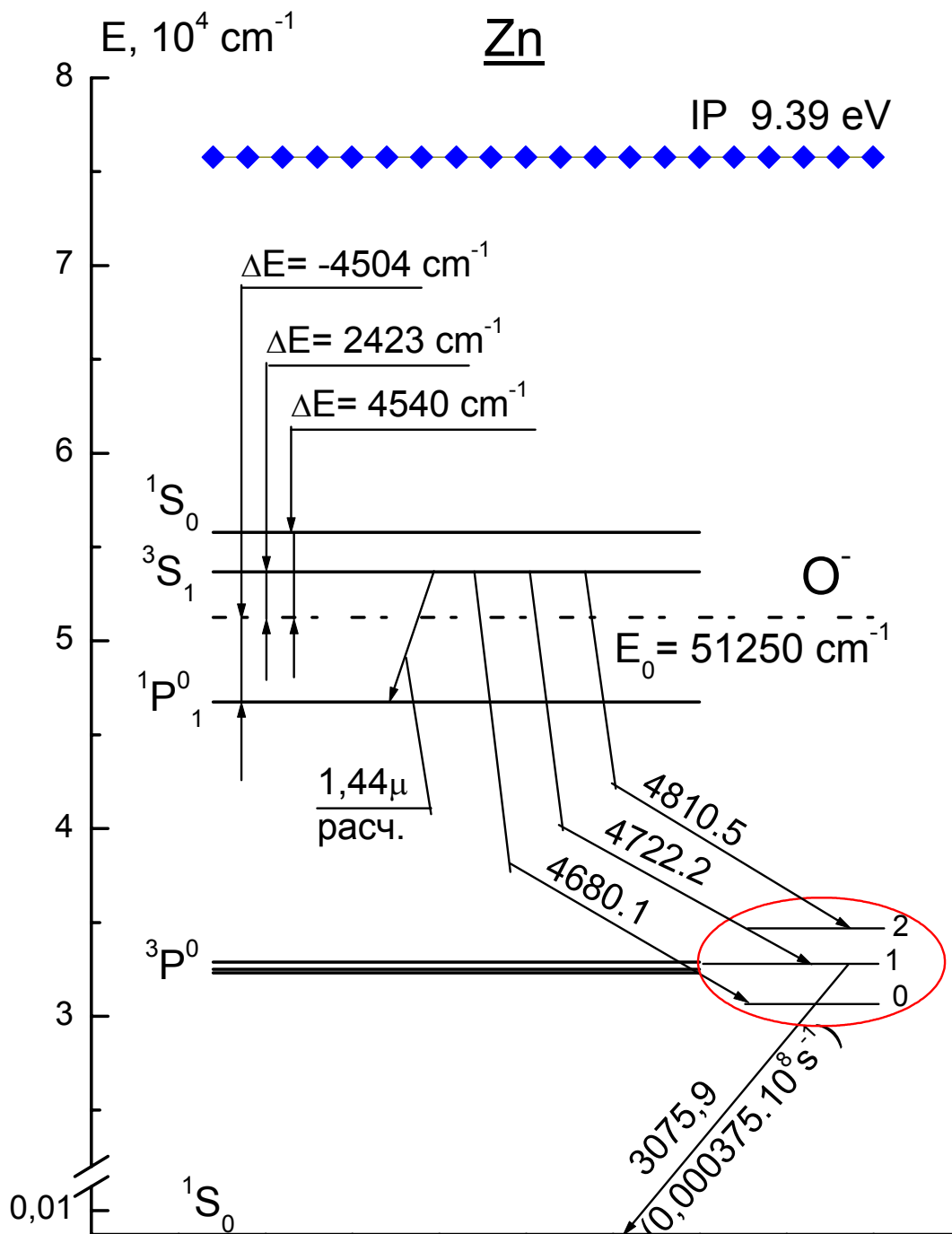


Рис.7. Схема уровней и переходов в атоме цинка

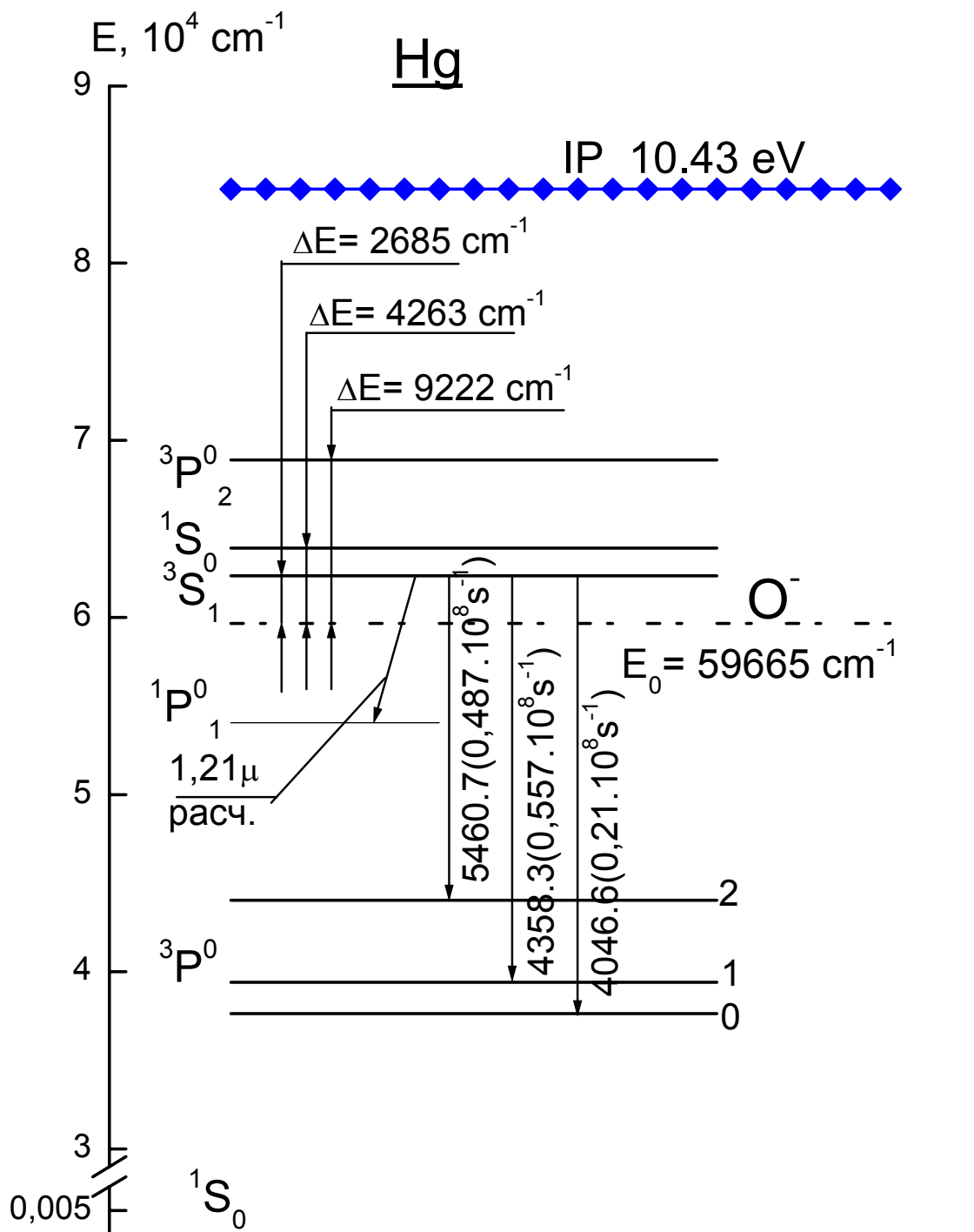


Рис.8. Схема уровней и переходов в атоме ртути

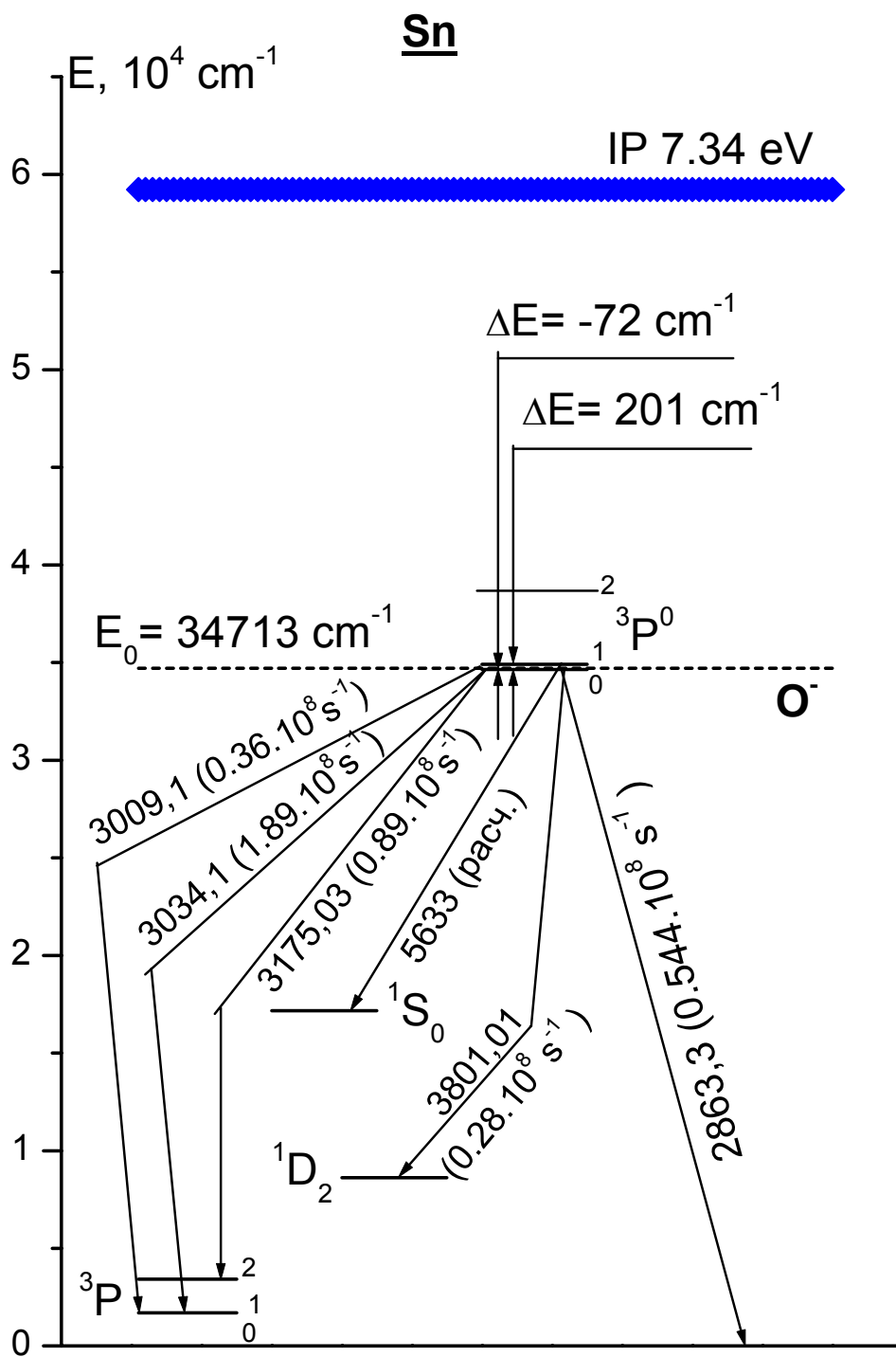


Рис.9. Схема уровней и переходов в атоме олова

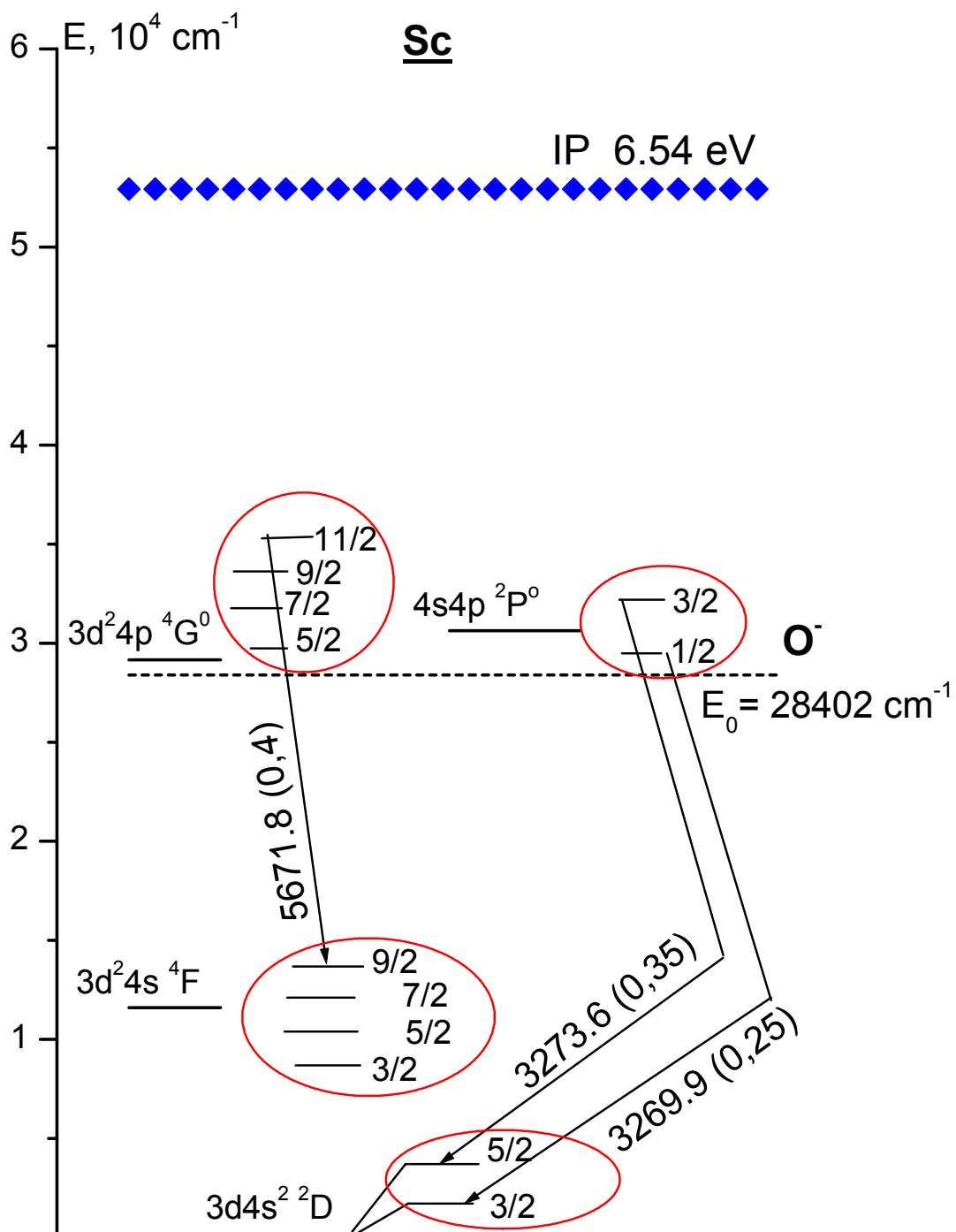


Рис.10. Схема уровней и переходов в атоме скандия

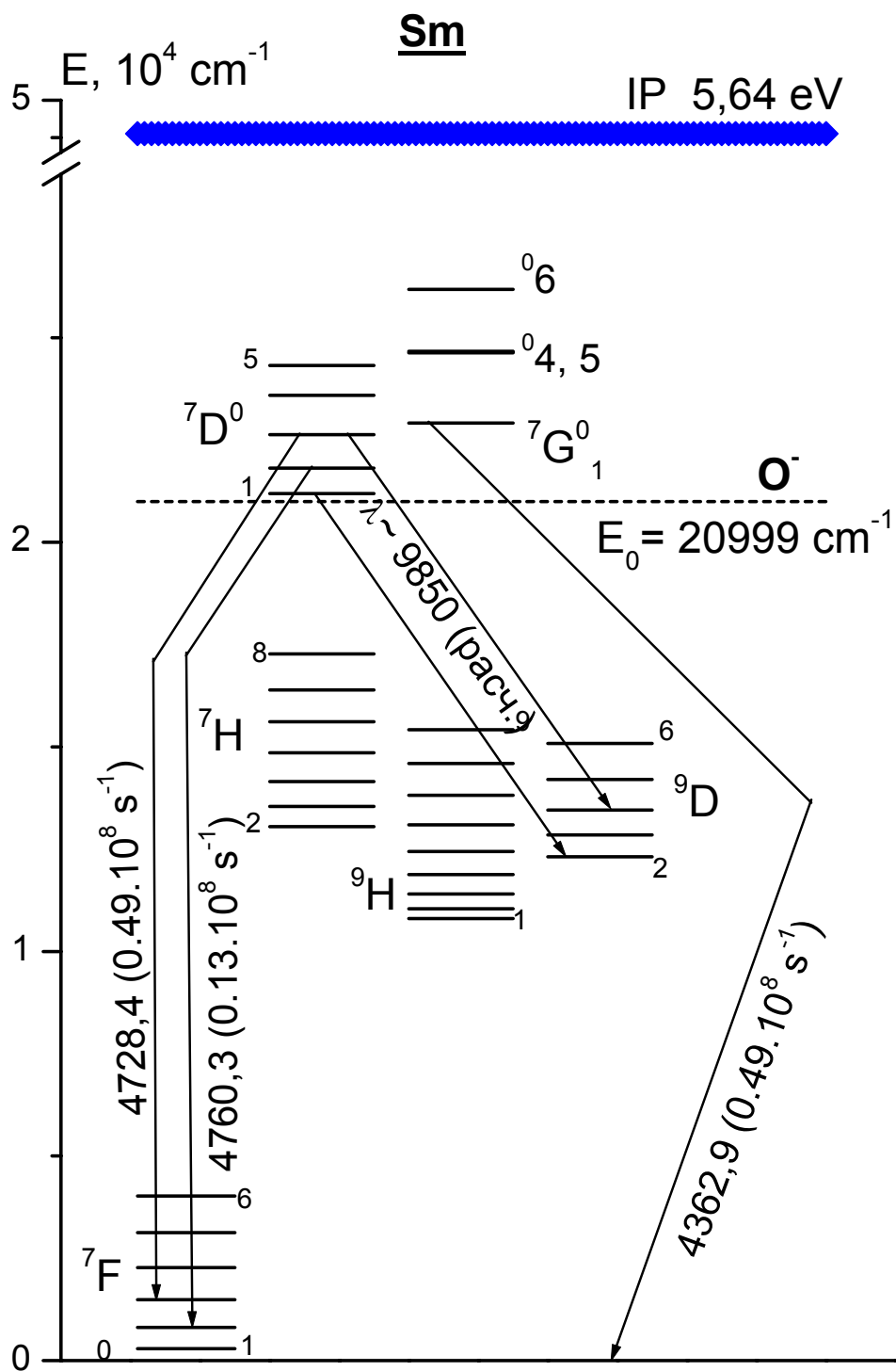


Рис.11. Схема уровней и переходов в атоме самария

В таблицах 2 и 3:

λ , нм – длины волн, рассчитанные по разности энергии термов из [6],
в Прим. - экспериментально определенные значения длин волн из [6].

Sc

Таблица 2.

$$E_0 = 28402 \text{ см}^{-1}$$

$$\Delta E = E_j - E_0$$

ΔE , $\text{см}^{-1}/\text{эВ}$	T_j	E_j , см^{-1}	T_i	E_i , см^{-1}	λ , нм	A_{ij} , 10^8с^{-1}	f_{ij}	Прим.
621/0,08	$^4G^0_{5/2}$	29022,82	$^4F_{3/2}$	11519,99	571,336			
	$^4G^0_{5/2}$	29022,82	$^4F_{5/2}$	11557,69	572,569			
	$^4G^0_{5/2}$	29022,82	$^4F_{7/2}$	11610,28	574,298			
694/0,09	$^4G^0_{7/2}$	29096,18	$^4F_{5/2}$	11557,69	570,175			
	$^4G^0_{7/2}$	29096,18	$^4F_{7/2}$	11610,28	571,889			
	$^4G^0_{7/2}$	29096,18	$^4F_{9/2}$	11677,38	574,092			
788/0,1	$^4G^0_{9/2}$	29189,84	$^4F_{7/2}$	11610,28	568,842			
	$^4G^0_{9/2}$	29189,84	$^4F_{9/2}$	11677,38	571,022			
902/0,11	$^4G^0_{11/2}$ 2	29303,51	$^4F_{9/2}$	11677,38	567,339		0,4	567,2
2171/0,27	$^2P^0_{1/2}$	30573,17	$^2D_{3/2}$	0	327,084	3,13	0,25	327,0
2305/0,29	$^2P^0_{3/2}$	30706,66	$^2D_{3/2}$	0	325,662			
	$^2P^0_{3/2}$	30706,66	$^2D_{5/2}$	168,34	327,457	2,81	0,35	327,4
	$^2F^0_{5/2}$	25584,64	$^4F_{3/2}$	11519,99	711,002			
	$^2F^0_{5/2}$	25584,64	$^4F_{5/2}$	11557,69	712,913			
	$^2F^0_{5/2}$	25584,64	$^4F_{7/2}$	11610,28	715,596			
	$^2F^0_{7/2}$	25724,68	$^4F_{5/2}$	11557,69	705,866			
	$^2F^0_{7/2}$	25724,68	$^4F_{7/2}$	11610,28	708,496			
	$^2F^0_{7/2}$	25724,68	$^4F_{9/2}$	11677,38	711,881			
	$^2F^0_{5/2}$	25584,64	$^2D_{3/2}$	0	390,86			
	$^2F^0_{5/2}$	25584,64	$^2D_{5/2}$	168,34	393,448			
	$^2F^0_{7/2}$	25724,68	$^2D_{5/2}$	168,34	391,29			

Таблица 3.

Sm

$E_0 = 20999,6 \text{ см}^{-1}$

$\Delta E = E_j - E_0$

$\Delta E, \text{ см}^{-1}/\text{эВ}$	T_j	$E_j, \text{ см}^{-1}$	T_i	$E_i, \text{ см}^{-1}$	$\lambda, \text{ нм}$	$A_{ij}, 10^8 \text{ с}^{-1}$	f_{ij}	Прим.
194/0,02	${}^7D_1^0$	21193,68	7F_0	0	471,838			
	${}^7D_1^0$	21193,68	7F_1	292,58	478,443			
	${}^7D_1^0$	21193,68	7F_2	811,92	490,634			
814/0,1	${}^7D_2^0$	21813,22	7F_1	292,58	464,670			
	${}^7D_2^0$	21813,22	7F_2	811,92	476,17	0,13		476,0
	${}^7D_2^0$	21813,22	7F_3	1489,55	492,037			
1632/0,2	${}^7D_3^0$	22632,30	7F_2	811,92	458,287			
	${}^7D_3^0$	22632,30	7F_3	1489,55	472,975	0,49		472,8
	${}^7D_3^0$	22632,30	7F_4	2273,09	491,178			
2595/0,3 2	${}^7D_4^0$	23594,84	7F_3	1489,55	452,380			
	${}^7D_4^0$	23594,84	7F_4	2273,09	469,004			
	${}^7D_4^0$	23594,84	7F_5	3125,46	488,534			
3324/0,4 1	${}^7D_5^0$	24323,51	7F_4	2273,09	453,506			
	${}^7D_5^0$	24323,51	7F_5	3125,46	471,741			
	${}^7D_5^0$	24323,51	7F_6	4020,66	492,541			
194/0,02	${}^7D_1^0$	21193,68	9D_2	12313,11	1126,053			
814/0,1	${}^7D_2^0$	21813,22	9D_2	12313,11	1052,619			
	${}^7D_2^0$	21813,22	9D_3	12846,64	1115,252			
1632/0,2	${}^7D_3^0$	22632,30	9D_2	12313,11	969,068			
	${}^7D_3^0$	22632,30	9D_3	12846,64	1021,903			
	${}^7D_3^0$	22632,30	9D_4	13458,46	1090,056			
2595/0,3	${}^7D_4^0$	23594,84	9D_3	12846,64	930,388			
	${}^7D_4^0$	23594,84	9D_4	13458,46	986,545			
	${}^7D_4^0$	23594,84	9D_5	14202,85	1064,737			

Продолжение таблицы 3

$\Delta E,$ $\text{см}^{-1}/\text{эВ}$	T_j	$E_j, \text{см}^{-1}$	T_i	$E_i, \text{см}^{-1}$	$\lambda, \text{нм}$	$A_{ij}, 10^8 \text{с}^{-1}$	f_{ij}	Прим.
3324/0,4 1	${}^7D_5^0$	24323,51	9D_4	13458,46	920,382			
	${}^7D_5^0$	24323,51	9D_5	14202,85	988,077			
	${}^7D_5^0$	24323,51	9D_6	15082,94	1082,184			
1914/0,2	${}^7G_1^0$	22914,07	7F_0	0	436,413	0,49		436,3
	${}^7G_1^0$	22914,07	7F_1	292,58	442,057			
	${}^7G_1^0$	22914,07	7F_2	811,92	452,444			
	${}^7G_1^0$	22914,07	7H_2	13050,05	1013,785			
	${}^7G_1^0$	22914,07	9H_1	10801,10	825,561			
	${}^7G_1^0$	22914,07	9H_2	11044,90	842,518			

Заключение.

Данная работа продолжает серию работ по поиску возможных систем для реализации импульсного лазера, инверсия в котором образуется в процессе ион-ионной рекомбинации. Как показано, использование в качестве отрицательного иона O^- позволяет расширить выбор атомов, служащих источниками положительных ионов, и рассмотреть большее число возможных переходов, перспективных с точки зрения получения эффективной генерации в видимой, УФ и ИК областях спектра. Однако такое увеличение возможностей создает и определенные трудности, связанные, в частности с необходимостью анализа богатого набора уровней и переходов для ряда атомов, имеющих хорошие π -резонансы с ионом кислорода. Пока никак не обсуждались в данной работе и сложности экспериментальной работы с кислородом, способным образовывать с большинством рассмотренных металлов устойчивые химические соединения, а также проблемы, связанные с методами получения отрицательного иона атомарного кислорода. В настоящее время недостаточно данных для обсуждения этих вопросов. Поиск таких данных еще предстоит, после чего можно будет приступить к обсуждению технических проблем, связанных с реализацией в эксперименте одной или нескольких из рассмотренных систем.

Литература

1. Петраш Г.Г., Земсков К.И., «Импульсный лазер на ион-ионной рекомбинации», *Оптика и спектроскопия*, Т. 94(1), сс. 118-122, 2003.
2. Петраш Г.Г., Земсков К.И., «Механизм импульсной инверсии при ион-ионной рекомбинации», *Препринт ФИАН № 33*, сс. 1-20, 2002.
3. Петраш Г.Г., Земсков К.И., «Возможные системы для реализации импульсного лазера на ион-ионной рекомбинации. I. Рекомбинация с отрицательными ионами галогенов», *Оптика и спектроскопия*, Т. 96(3), сс. 493-499, 2004.
4. *Физические величины*, справочник, ред. И.С.Григорьев, Е.З.Мейлихов, М., Энергоатомиздат, 1991.
5. Шухтин А.М., Тибилев А.С., «Лазер на линиях натрия при рекомбинации Na^+ и H^- », в сб. *Физика газовых лазеров*, Л. Изд. ЛГУ, сс. 122-144, 1969.
6. NIST Atomic Spectra Database [Ver. 3.0 \(http://physics.nist.gov/PhysRefData/\)](http://physics.nist.gov/PhysRefData/).