

О ЗАСЕЛЕНИИ ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ
ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПАРОВ ЦЕЗИЯ

А. Н. Ключарев и В. Ю. Сепман

Проведено исследование спектра флуоресценции паров цезия. Измерены заселенности некоторых верхних уровней цезия. Показано, что в парах цезия, возбуждаемых светом стоваттной гелиевой лампы (p Cs 10^{-3} — 10^{-2} тор) образуется плазма с концентрацией электронов 10^8 — 10^9 см $^{-3}$ и средней энергией E_{cp} = 0.3 эв.

В пределах доплеровской ширины яркая линия гелия 388.8 нм совпадает с одной из компонент сверхтонкой структуры линии цезия для перехода $8^2P_{1/2}$ — $6^2S_{1/2}$. Это обстоятельство использовалось, в частности, для оптического возбуждения $8^2P_{1/2}$ -уровня цезия при создании лазера на парах цезия [1, 2]. Недавно были опубликованы экспериментальные оценки эффективных сечений процессов передачи энергии от возбужденных $8^2P_{1/2}$ -состояний атомов цезия за счет ударов 2-го рода с нормальными атомами [3]. Полученные данные находятся в хорошем согласии с результатами теоретических расчетов [4]. Однако измеренные в работе [1] заселенности уровня $8^2P_{3/2}$ оказываются по величине на несколько порядков больше, чем следовало бы ожидать за счет процесса $8^2P_{1/2} + 6^2S_{1/2} \rightarrow 8^2P_{3/2} + 6^2S_{1/2}$ при использовании данных из работ [3, 4].

Таким образом, приходится предположить, что в парах цезия, облучаемых гелиевой линией 388.8 нм, могут идти процессы, приводящие к заселенности верхних уровней, отличные от тех, что рассматривались в работах [3, 4]. Такими процессами могут быть, например, столкновения возбужденных атомов со свободными электронами.

В условиях подобных экспериментов (с учетом эффекта пленения резонансного излучения) следует ожидать заметных концентраций на первых резонансных уровнях с $E_{возб.}$ = 1.4 эв, заселяемых путем каскадных переходов сверху. Рассчитанное по принципу детального равновесия эффективное сечение процесса передачи энергии от возбужденных атомов медленным электронам по порядку величины равно 10^{-14} см 2 .

Используя полученные одним из нас данные для эффективного сечения процесса ассоциативной ионизации из $8^2P_{1/2}$ состояния возбужденного атома цезия [5], можно показать, что в оптимальном режиме работы лазера на парах цезия [1] процесс ассоциативной ионизации обеспечивает образование не менее 10^{10} — 10^{11} ионов/см 3 сек.

Образующиеся медленные электроны могут затем ускориться при столкновении с 6^2P -возбужденными атомами. В этом случае в спектре флуоресценции должны присутствовать линии с верхних уровней, заселяемых ступенчатым путем из $8^2P_{1/2}$ -состояния атома цезия при электронно-атомных соударениях.

Мы провели исследование спектра флуоресценции паров цезия, облучаемых светом гелиевой газоразрядной плазмы. Схема нашего эксперимента в принципе не отличалась от схемы, использованной в работах [1, 2], за исключением того, что гелиевая лампа была выполнена в виде спирали и работала в постоянном режиме. Регистрация оптических сигналов в диа-

пазоне 900–600 нм проводилась по методу фазового детектирования. В качестве диспергирующего прибора использовался монохроматор СД-1 с решеткой 1200 штр./мм. В спектре флуоресценции было наблюдеено появление линий побочных серий с уровней, лежащих по шкале энергий на 0.01–0,3 эв выше состояний 8^2P (см. рисунок). По измерениям яркости линий диффузной и резкой серий оценивались заселенности 8^2S - и 6^2D -

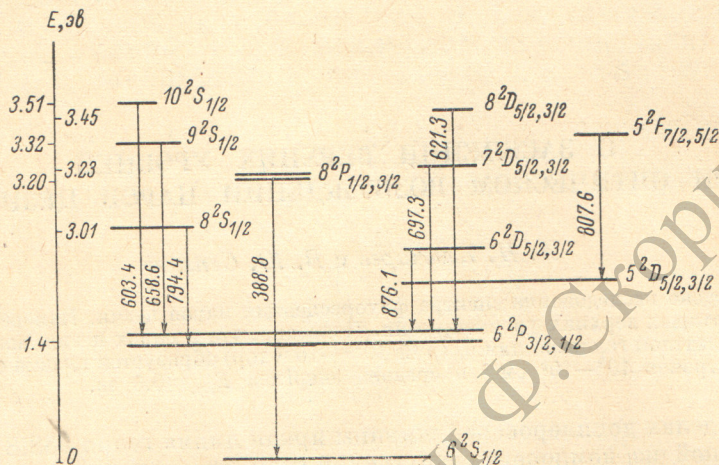


Рис. 1. Спектр Cs I, наблюдаемый при оптическом возбуждении $8^2P_{1/2}$ уровня цезия.

уровней. Суммарная заселенность третьего резонансного дублета оценивалась по концентрации атомов на 8^2S - и 6^2D -уровнях. При этом максимальная погрешность в определении заселенности 8^2P -состояний по нашей оценке не превышала 30%. Концентрация на уровнях, лежащих выше состояний 8^2P , определялась по измерениям яркости соответствующих переходов с использованием данных для времен жизни из работ [6, 7].

Концентрация на нижних резонансных 6^2P -уровнях оценивалась по поглощению линий побочных серий спектра цезия от высокочастотной цезиевой лампы. Измеренные заселенности уровней цезия при концентрации атомов $N_0 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ приведены в табл. 1.

Оценка каскадного заселения уровней 6^2P с учетом пленения резонансного излучения не противоречит экспериментальным данным. Полученная инверсия заселенностей 8^2P - и 8^2S -состояний хорошо согласуется с результатами работы [1].

Используя данные, приведенные в табл. 1, легко показать, что концентрации на уровнях, лежащих выше возбужденного состояния атома цезия, даже по порядку величины не могут быть объяснены ударами 2-го рода возбужденных и нормальных атомов цезия.

Система электродов, впаянных в кювету, позволяла оценить концентрацию и температуру электронов методом ленгмюровского зонда по электронной части зондовой характеристики. Зондовые характеристики, построенные обычным образом, хорошо воспроизводились и позволяли уверенно определять среднюю энергию и концентрацию электронов. Эти измерения при давлении пара цезия $10^{-3} \div 10^{-2}$ тор показали, что в парах цезия присутствуют свободные электроны (образуется плазма) с $n_e \cdot 10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$ и энергией электронов $E_{\text{ср.}} \sim 0.3 \text{ эв}$.

Таблица 1

Уровни	Энергия возбуждения, эв	$N^* \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3}$
10^2S	3.51	0.03
8^2D	3.45	0.07
9^2S	3.32	0.15
5^2F	3.32	0.4
7^2D	3.23	1.5
8^2P	3.20	130
8^2S	3.01	12
6^2P	1.4	$< 10^3$

В условиях эксперимента при энергии электронов $E \geq 1.4$ эв частота электрон-электронных столкновений много меньше частоты неупругих соударений.

Следовательно, функция распределения электронов по скоростям должна быть обеднена быстрыми электронами. (Это обстоятельство не может сказаться на определении $E_{\text{ср.}}$ по наклону электронной ветви зондовой характеристики в полулогарифмическом масштабе, так как $E_{\text{ср.}} < 1$ эв.) Действительно, заселенности 6^2P -уровней ($E_{\text{возб.}} = 1.4$ эв.), рассчитанные в предположении их прямого электронного возбуждения при максимальном виде функции распределения ($T_e = 0.3$ эв), оказались на несколько порядков меньше измеренных. По данным нашего эксперимента можно было оценить с точностью до коэффициента 2 скорости ступенчатого электронного возбуждения верхних состояний цезия с уровней 8^2P . Полученные результаты сравнивались с расчетными оценками $\langle \sigma v \rangle$ для тех же уровней, полученными приближенным методом Бориа по способу, развитому в работах Вайнштейна и Собельмана [8] (табл. 2). Совпадение расчетных и экспериментальных данных можно считать удовлетворительным.

Таблица 2

Уровни	$\langle \sigma v \rangle_{\text{расч.}}$ см ³ /сек.	$\langle \sigma v \rangle_{\text{экспер.}}$ см ³ /сек.
10^2S	$3.5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$
8^2D	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
9^2S	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, в работе было показано, что в парах цезия, возбуждаемых светом стоваттной гелиевой лампы (p Cs $10^{-3} \div 10^{-2}$ тор), образуется плазма с концентрацией электронов $10^8 \div 10^9$ см³ и средней энергией $E_{\text{ср.}} = 0.3$ эв.

Наблюдаемое в эксперименте расхождение измеренной и рассчитанной заселенностей 6^2P -резонансных уровней цезия может быть объяснено, если предположить, что функция распределения электронов по энергии в такой плазме обеднена быстрыми электронами. В результате этого процесс прямого электронного возбуждения верхних уровней оказывается малоэффективным по сравнению со ступенчатыми процессами электронного возбуждения.

В заключение отметим, что наличие в объеме свободных электронов (при достаточно больших электронных концентрациях) может привести к уменьшению инверсии заселенностей на лазерных уровнях 8^2P и 8^2S , 6^2D .

Авторы выражают свою признательность С. Э. Фришу за постоянное внимание к работе и Р. И. Лягушенко за полезные обсуждения.

Литература

- [1] S. Jacobs, G. Gould, P. Rabinowitz. Phys. Rev. Lett., 7, 415, 1961.
- [2] P. Rabinowitz, S. Jacobs, G. Gould. Appl. Opt., 1, 513, 1962.
- [3] M. Pimbert, J. Cuvellier, J. Pascall, F. Gounand. Abstracts of papers of the 7 International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions. Amsterdam, 1971.
- [4] A. A. Zembekov, E. E. Nikitin, A. I. Reznicev. Abstracts of papers of the 7 International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions. Amsterdam, 1971.
- [5] А. Н. Ключарев, Н. С. Рязанов. Опт. и спектр., 31, 347, 1971.
- [6] P. M. Stone. Phys. Rev., 127, 1151, 1962.
- [7] Э. М. Андерсон, В. А. Зилилис. Опт. и спектр., 16, 382, 1964.
- [8] Л. А. Вайнштейн, И. Н. Собельман. Препринт, ФИАН, № 66, М., 1967.

Поступило в Редакцию 22 мая 1972 г.