

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПЯТИФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ  
АТОМА Na И ЧЕТЫРЕХФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМА Cs В ПОЛЕ  
ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОМОДОВОГО НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

Т. У. Арсланбеков, В. А. Гринчук,

Г. А. Делоне, К. Е. Петросян

УДК 621.375.82

Проведено экспериментальное измерение сечений пятифотонной ионизации атома натрия и четырехфотонной ионизации атома цезия, используя излучение одномодового лазера на стекле с неодимом. Результаты измерений сравниваются с теоретическими расчетами.

За последнее время опубликовано большое число работ [1,2], в которых приведены величины сечений процесса многофотонной ионизации, измеренные для ряда атомов и частот излучения. Отличительной чертой этих экспериментов является использование излучения многомодовых твердотельных лазеров. Известно, что вероятность процесса многофотонной ионизации в отсутствие резонансов равна:

$$W = \alpha G \bar{F}^k, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - сечение процесса многофотонной ионизации;  $G = \bar{F}^k / \bar{F}^k$ ,  $\bar{F}$  - средняя интенсивность излучения, измеряемая в эксперименте, а  $k$  - число поглощенных квантов.

Известно также, что фактор  $G$  может изменяться в больших пределах в зависимости от статистических свойств излучения и величины  $k$ . Так, например, в случаях одномодового и многомодового излучения величина  $G = 1/k!$ , соответственно [4].

Данная работа посвящена измерению сечений пятифотонной ионизации атома натрия и четырехфотонной ионизации атома цезия в поле излучения одномодового лазера на стекле с неодимом.

В эксперименте использовался метод пересечения пучков сфокусированного лазерного излучения и атомов щелочных металлов. Неодимовый лазер ( $\lambda = 10600 \text{ \AA}$ ) с модуляцией добротности пассивным

затвором работал в режиме одной продольной и поперечной моды ( $TEM_{001}$ ). Одномодовый режим генерации достигался благодаря использованию дисперсионного резонатора, выходным зеркалом которого являлся сложный интерферометр Фабри-Перо /6/. Контроль одномодовости осуществлялся в каждом импульсе генерации двумя методами. Во-первых, измерялась временная характеристика импульса излучения с помощью фотозлемента ФЭК-09 и осциллографа И2-7 с общим разрешением  $\sim 1$  нсек. Этот метод позволяет зарегистрировать появление второй моды по бленчам при межмодовом расстоянии  $\Delta\nu \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Во-вторых, наблюдался спектр излучения с помощью интерферометра Фабри-Перо с разрешением  $\Delta\nu \geq 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Излучение лазера было линейно поляризовано. Методика измерения пространственного и временного распределений интенсивности лазерного излучения, а также метод детектирования образованных ионов подробно описаны в работе /1/.

Для вычисления сечения многофотонной ионизации использовался наиболее точный метод относительных измерений /5/, при котором в эксперименте измеряется относительное изменение числа ионизированных атомов за счет уменьшения плотности нейтральных атомов в объеме ионизации при больших интенсивностях излучения, когда вероятность ионизации атома за длительность импульса излучения лазера близка к 1 (эффект насыщения).

Зависимость числа ионизированных атомов от интенсивности излучения в условиях, когда имеет место эффект насыщения, описывается уравнением /3,5/,

$$N_1 = n_0 \int_0^{V_0} \left[ 1 - \exp \left\{ -\alpha \tau F_m^k F^k(\nu) \right\} \right] dV = n_0 V_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\alpha \tau F_m^k)^n V_n}{n! V_1}, \quad (2)$$

где  $n_0$  - плотность нейтральных атомов,  $\alpha$  - сечение многофотонной ионизации;  $\tau = \int_0^{\tau_0} \varphi^k(t) dt$  - характерное время для  $k$  - квантового процесса;  $\varphi(t)$  - функция распределения интенсивности излучения во времени;  $\tau_0$  - длительность импульса лазерного излучения;

$V_n = \int_0^{V_0} F^{nk}(x, y, z) dV$  - характерный объем для  $k$  - квантового

процесса;  $f(x, y, z)$  - функция пространственного распределения интенсивности излучения,  $V_0$  - объем, из которого в условиях эксперимента вытягиваются и детектируются ионизованные атомы;  $F_m$  - максимальная интенсивность, достигаемая в какой-либо точке пространства-времени. Функции  $f(x, y, z)$ ,  $\varphi(t)$  нормированы на единицу при  $F = F_m$ .

Зависимость  $N_1$  от  $F_m$  в том случае, когда эффект насыщения несущественен, описывается уравнением:  $N_{i0} = n_0 \alpha F_m^k V_1$ . Тогда изменение числа ионизованных атомов за счет уменьшения плотности нейтральных атомов в объеме ионизации, благодаря эффекту насыщения, будет равно отношению  $y = N_1/N_{i0}$  и описывается уравнением:

$$y = \frac{N_1}{N_{i0}} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\alpha F_m \tau)^{n+1} V_1}{(n+1)! V_1} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \alpha^n F_m^{nk}, \quad (3)$$

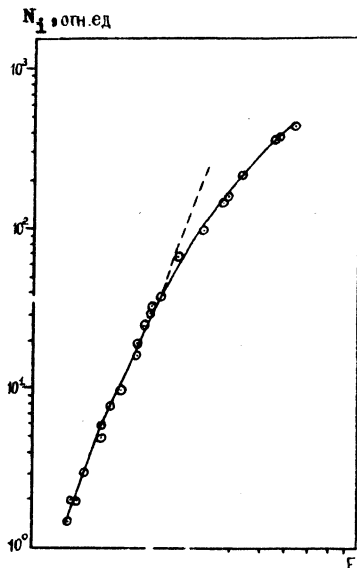
где 
$$P_n = \frac{(-1)^n V_1^{n+1}}{(n+1)! V_1}.$$

Для определения сечения многофотонной ионизации  $\alpha$  в эксперименте измеряются величины  $f(x, y, z)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $q$  и вычисляются  $\tau_1$ ,  $V_1$ ,  $V_n$ ,  $F_m$ ,  $N_1(F_m)$ , с помощью которых строится зависимость  $y = N_1/N_{i0}$  от  $F_m$ . Аппроксимируя  $y = N_1/N_{i0}$  уравнением (3) с помощью метода наименьших квадратов, находим величину  $\alpha$ . Расчеты ведутся на ЭВМ.

Для оценки ошибки сечение  $\alpha$  вычислялось при значениях  $P_n$  и  $F_m$  соответствующих максимальной и минимальной оценке абсолютной ошибки измерения всех параметров, входящих в  $P_n$  и  $F_m$ . Полученные таким образом ошибки сечения представляют собой предельные значения, которые возможно получить за счет максимальных оценок ошибок абсолютизации всех параметров в  $P_n$  и  $F_m$ .

На рис. I в дважды логарифмическом масштабе приведена экспериментально измеренная зависимость  $N_1(F_m)$  для атома Na. Хорошо видна область интенсивностей, где эффект насыщения несущественен и зависимость носит линейный характер в соответствии с уравнением  $\lg F_{i0} \approx k \lg F_m$ . Экстраполируя эту зависимость на большие интенсивности, где благодаря эффекту насыщения резко меняется характер зависимости  $N_1(F_m)$ , измеряя отношение  $N_1/N_{i0}$  строилась зависимость  $y = N_1/N_{i0}$  и вычислялось сечение  $\alpha$  методом, описанным выше.

Результаты измерения сечений пяти- и четырехфотонной ионизации атомов Na и Ca излучением неодимового лазера приведены в таблице. Здесь же даны результаты расчетов сечений этих атомов, проведенные в двух теоретических работах /7,8/. В обоих случаях ис-



Р и с.1. Зависимость ионного сигнала атома натрия  $N_1$  от интенсивности излучения лазера  $F$

пользовалась нестационарная теория возмущений, в которой расчет сечений  $K$ -фотонной ионизации сводится к необходимости вычисления составных матричных элементов  $K$ -го порядка, включая суммирование по дискретному и непрерывному спектру сложного атома. Однако, в работе /8/ для упрощения задачи был применен метод усреднения сил осцилляторов в составных матричных элементах, в то время как в работе /7/ все расчеты основаны на использовании функции Грина оптического электрона в приближении метода квантового дефекта. Как и следовало ожидать, лучшее количественное согласие с экспериментом дают расчеты последним методом, однако даже приближенный метод расчета /8/ величины сечений удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами.

Таблица I

Экспериментальное и теоретическое значения сечений  
ионизации атомов Na и Cs

Атом	эксперим.	теор./7/	теор./8/
Na	$10^{-136,9 \pm 0,5}$	$10^{-137,4}$	$10^{-140,3}$
Cs	$10^{-107 \pm 0,2}$	$10^{-107}$	$10^{-105,2}$

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Н. Б. Делоне и М. С. Рабиновичу за постоянный интерес к работе и ценные дискуссии.

Поступила в редакцию  
28 августа 1975 г.

## Л и т е р а т у р а

1. Г. А. Делоне, Н. Е. Делоне, В. К. Золотарев, Н. Л. Манаков, Г. К. Пискова, М. Т. Турсунов. ЖЭТФ, 65, 481 (1973).
2. В. Held, G. Mainfray, J. Morellec. Phys. Lett., A25, 257 (1971), R. A. Fox, R. M. Kogan, E. J. Robinson. Phys. Rev. Lett., 26, 1416 (1971); K. G. Evans, P. C. Thoneman. Phys. Lett., A 39, 133 (1972); И. Бакш, М. Л. Нагаева, В. Г. Овчинников, Д. Рубин. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 3 (1973).
3. S. L. Chin, N. R. Isenor, M. Young. Phys. Rev., 188, 7(1969); M. R. Cervenak, N. R. Isenor. Opt. Comm., 10, 280 (1974); А. И. Арутюнян, Г. А. Аскарьян, В. А. Цогосян. ЖЭТФ, 58, 1020 (1970).
4. C. S. Agarwal. Phys. Rev., A 1, 5 (1970); И. В. Томов, А. С. Чиркин. Квантовая электроника, 1, 110 (1971). Т. У. Урсланбеков. Квантовая электроника (1975).
5. G. A. Delone, G. K. Piskova, N. B. Delone. Proc. of X Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Oxford, 1971, p.33.
6. Д. Т. Алтмов, Т. У. Арсланбеков, М. С. Белкин, Н. Б. Делоне, О. Е. Монастырский. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 16 (1973).
7. N. L. Manakov, M. A. Preobragensky, L. P. Rapoport. Proc. of 11 Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Praha, 1973, p.25.
8. V. M. Morton. Proc. Phys. Soc., 92, 301 (1967).