

НАБЛЮДЕНИЕ ДВУХЭЛЕКТРОННОГО ОДНОФОТОННОГО ПЕРЕХОДА В  $E_{uIII}$  ПРИ ЭЛЕКТРОН-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

*В. Л. Голдовский, Л. Л. Шимон, И. П. Запесочный,  
А. М. Соломон*

Впервые обнаружено явление образования двойной  $5p$ -вакансии в атоме европия и испускание одного фотона ( $\lambda = 68,3$  нм) при одновременном заполнении этой вакансии электронами с  $5s$ - и  $6s$ -подоболочек.

В работе сообщается об экспериментах по возбуждению внешних замкнутых оболочек атомов редкоземельных элементов электронным ударом. По спектрам в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) исследовался характер возбуждения электронов из  $5p$ -подоболочек целого ряда редких земель ( $Sm, Eu, Tm, Yb$ ). Данное сообщение посвящено экспериментальному обнаружению и анализу эффекта испускания одного фотона в результате заполнения двойной вакансии в  $5p$ -подоболочке европия электронами из различных оболочек.

На экспериментальной установке, описанной в [1], в пересекающихся электронном и атомном пучках исследовался эмиссионный спектр европия в ВУФ диапазоне (40 — 140 нм), излучаемый при различных энергиях бомбардирующих электронов. Как оказалось большинство тесно расположенных групп линий в этих спектрах имеет порог возбуждения  $\sim 30$  эВ и возникает в результате заполнения вакансии в  $5p$ -подоболочке, образующейся при электрон-атомных столкновениях [2].

Обнаруженная в [2] сравнительно высокая эффективность  $5p$ -ионизации электронным ударом обусловлена исключительной устойчивостью наполовину заполненной  $4f$ -подоболочки [3], экранирующей  $5p$ -подоболочку от ядра. Это обстоятельство дает основание полагать, что в атоме европия с заметной вероятностью может протекать и двукратная  $5p$ -ионизация.

В качестве исходного материала послужила неотожествленная группа линий в спектре  $E_u$  с длиной волны  $\lambda = 68,3$  нм (см. рис. 1). Дополнительные эксперименты позволили получить функцию возбуждения этой группы линий, представленную на рис. 2, и определить ее энергию возбуждения, равную  $\sim 75$  эВ.

Эту группу линий с таким высоким потенциалом появления можно интерпретировать либо как следствие радиационного перехода между возбужденными состояниями трехкратного иона  $E_{uIV}$ , либо как результат радиационного распада двойной  $5p$ -вакансии. Однако первый процесс связан со значительной перестройкой электронных оболочек в результате удаления обоих внешних  $6s$ -электронов, однако  $4f$ -электрона и, кроме того, возбуждения одного из электронов остатка в некоторое нерезонансное  $nl$ -состояние. Поэтому более вероятным представляется процесс, состоящий в удалении всего двух электронов из хоро-

шо экранированной от ядра  $5p$ -подоболочки, не затрагивающий устойчивую  $4f$ -подоболочку европия.

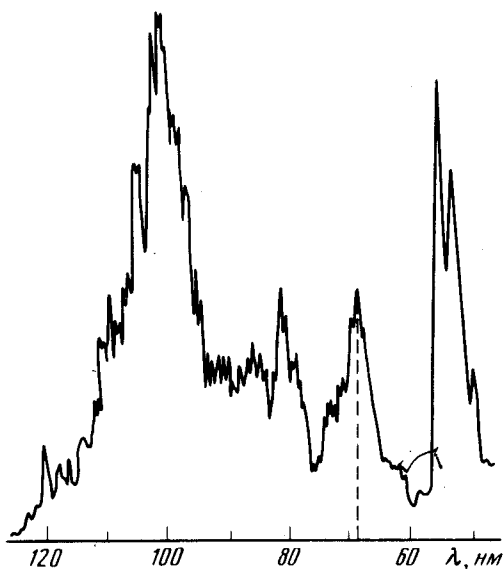


Рис. 1. Спектр атома европия при энергии бомбардирующих электронов 150 эВ

Очевидно, что для надежной идентификации рассматриваемой группы линий ( $\lambda = 68,3$  нм) необходимо знание энергии образования двойной  $5p$ -вакансии в атоме  $E_u$ . Обычно при решении подобных задач проводят расчеты с помощью аппарата квантовой теории многих тел с применением ЭВМ [4]. Однако эти расчеты являются очень сложными и трудоемкими, в особенности для многоэлектронных атомов. Поэтому целесообразно получить хотя бы оценочное значение энергии образования двойной вакансии в атоме, исходя из той или иной модели атома.

Для этой цели мы выбрали сферически симметричную модель атома, в которой заряды электронов представляются равномерно распределенными по поверхностям сфер с радиусами  $r$ , вычисленными по методу Хартри — Фока — Слейтера для соответствующих подоболочек с квантовыми числами  $n$  и  $l$  [5]. Тогда можно считать, что энергия образования двойной вакансии  $E^{++}(r)$  равна удвоенному значению энергии образования одной вакансии  $E^+(r)$  плюс некоторая энергетическая добавка:

$$E^{++}(r) = 2E^+(r) + \Delta E(r). \quad (1)$$

Энергетическая добавка в общем случае обусловлена, как это показано в [4], следующим: 1) перестройкой электронных оболочек при ионизации атома; 2) взаимодействием вакансий; 3) виртуальным возбуждением других вакансий. Полученные по выбранной нами модели атома выражения для  $E^{++}(r)$  и  $E^+(r)$  приводят к простой формуле энергетической добавки:

$$\Delta E(r) = e^2/r, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона.

Элемент	Конфигурация основного состо- яния атома	Конфигурация основного состо- яния двукр. иона	$E^{++}$ , эВ расчет	$E^{++}$ , эВ эксперим. [6]
Sc	$2p^6 3s^2 3p$	$2p^6 3s$	23,88	24,81
	$3p^6 3d 4s^2$	$3p^6 3d$	19,52	19,45
Ga	$3d^{10} 4s^2 4p$	$3d^{10} 4s$	24,38	26,51
	$4p^6 4d 5s^2$	$4p^6 4d$	18,99	18,61
In	$4d^{10} 5s^2 5p$	$4d^{10} 5s$	22,68	24,64
	$5s^2 5d 6s^2$	$5s^2 5d$	16,46	17,04
Tl	$5d^{10} 6s^2 6p$	$5d^{10} 6s$	26,09	26,53
	$5p^6 4f^2 6s^2$	$5p^6 4f^7$	16,93	16,91
Yb	$5p^6 4f^{14} 6s^2$	$5p^6 4f^{14}$	29,59	29,20

В таблице приведены энергии двукратной ионизации некоторых атомов элементов третьей группы, рассчитанные нами, исходя из сферически симметричной электростатической модели атома. Там же для сравнения приведены экспериментальные данные [6]. Как видно из таблицы, в целом результаты наших расчетов хорошо согласуются с экспериментом, что и послужило критерием применимости такой модели атома для оценки энергии образования двойной 5p-вакансии в атоме Eu. По нашим расчетам эта энергия имеет величину 75 эВ, которая находится в хорошем согласии с экспериментально определяемой пороговой энергией возбуждения группы спектральных линий  $\lambda = 68,3$  нм (см. рис.2).

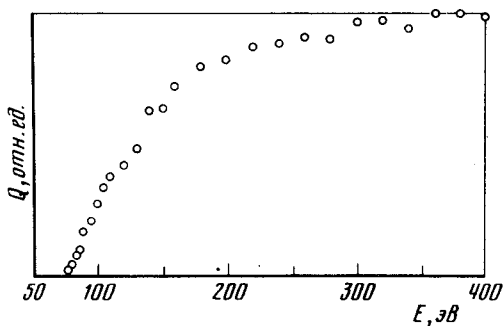


Рис. 2. Энергетическая зависимость интенсивности излучения европия в области  $\lambda = 68,3$  нм

Для отождествления нижнего состояния  $\text{Eu III}$ , соответствующего наблюдаемому излучению с  $\lambda = 68,3$  нм (энергия фотонов которого составляет 18 эВ), нами были рассчитаны энергии различных электронных конфигураций по предложенной модели, так как имеющиеся данные по энергиям различных электронных конфигураций атома европия в [7] являются неполными. Как показал детальный анализ, в качестве нижнего состояния для  $\lambda = 68,3$  нм наиболее подходит конфигурация  $5s 5p^6 4f^7 6s$ , которой отвечает рассчитанное значение энергии 56,43 эВ.

