

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СВЯЗАННЫХ И АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ИТТЕРБИЯ В ПРОЦЕССЕ ТРЕХФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ

А.И.Гомонай, И.П.Запесочный

*Институт электронной физики АН Украины
294016 Ужгород, Украина*

Поступила в редакцию 26 апреля 1993 г.

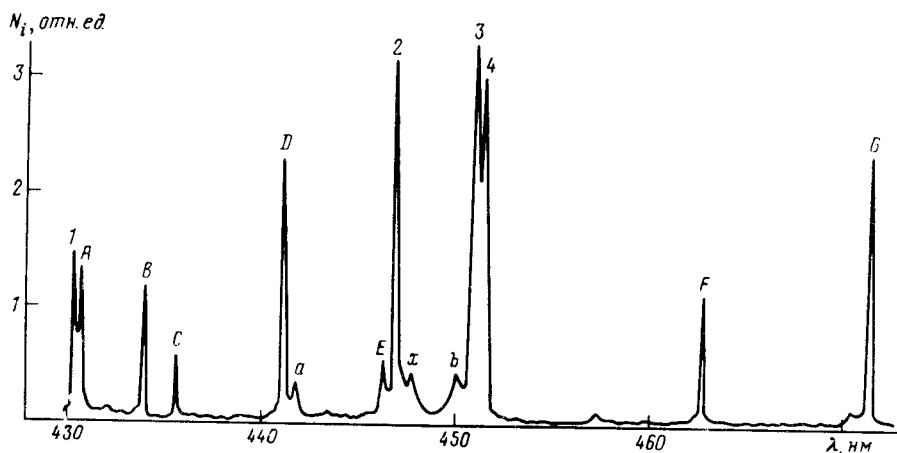
Приводятся результаты первых исследований однократной трехфотонной ионизации атома иттербия в области длин волн 430–472 нм. В зависимости выхода ионов Yb^+ от длины волны лазерного излучения наблюдалось большое количество резонансных максимумов, обусловленных возбуждением связанных и автоионизационных состояний. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе ионизации атома иттербия весьма важную роль играют переходы, связанные с возбуждением внутренней $4f^{14}$ -подоболочки.

Исследования процесса многофотонной ионизации щелочноземельных атомов показали, что особенности их спектров (наличие двухэлектронных связанных и автоионизационных состояний) приводят к значительному усложнению картины взаимодействия лазерного излучения с этими атомами по сравнению со щелочными металлами [1]. В этом плане большой интерес представляют редкоземельные элементы. Они также имеют два s -электрона на внешней оболочке, однако отличаются от щелочноземельных наличием достраивающейся $4f$ -подоболочки [2]. Целью данной работы как раз и было исследование особенностей возбуждения $4f^{14}$ - и $6s^2$ -подоболочек при трехфотонной ионизации атома иттербия лазерным излучением в области длин волн 430–472 нм.

Исследования проводились на установке с пересекающимися лазерным и атомным пучками. Ионы, образованные в результате многофотонной ионизации, вытягивались из области пересечения пучков постоянным электрическим полем, разделялись по массе и заряду во времяпролетном масс-спектрометре и детектировались вторичным электронным умножителем. В качестве источника ионизирующего излучения использовался импульсный перестраиваемый лазер на красителе с шириной спектра генерации $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$. Исследования проводились при линейной поляризации излучения и напряженности поля в области пересечения пучков $\sim 4 \cdot 10^4 \text{ В/см}$.

На рисунке представлена зависимость выхода ионов Yb^+ от длины волны лазерного излучения $N_i(\lambda)$. Характерной ее особенностью является наличие большого числа ярко выраженных резонансных максимумов, которые, как показал анализ имеющихся данных о спектре атома иттербия [3,4], могут быть условно выделены в три группы. Первую группу составляют резонансные максимумы, обусловленные двухфотонным возбуждением электронов только внешней $6s$ -подоболочки. К ним относятся максимумы 1–4, соответствующие переходам:

$$\begin{aligned} 1 &- 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 2h\nu - 4f^{14}6s8d\ ^3D_2, \\ 2 &- 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 2h\nu - 4f^{14}6p^2\ ^3P_2, \\ 3 &- 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 2h\nu - 4f^{14}6s7d\ ^1D_2, \\ 4 &- 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 2h\nu - 4f^{14}6s7d\ ^3D_{2,1}. \end{aligned}$$



Зависимость выхода ионов Yb^+ от длины волны лазерного излучения

Переходы 1, 2, 4 связаны с возбуждением триплетных состояний термов 3P , 3D и являются интеркомбинационными. При этом амплитуды максимумов 2, 4 сравнимы с амплитудой максимума 3, обусловленного возбуждением синглетного состояния $4f^{14}6s7d^1D_2$, а максимум 1 примерно в два раза меньше максимума 3. Максимум 4 представляет собой два неразделенных максимума с близлежащими состояниями $4f^{14}6s7d^3D_2$ и $4f^{14}6s7d^3D_1$, разница в энергетическом положении которых составляет $\Delta E = 2 \text{ см}^{-1}$.

Максимумы же второй группы связаны с возбуждением более глуболежащей $4f$ -подоболочки. В нее входят максимумы А – G, которые соответствуют двухфотонным переходам:

$$\begin{aligned}
 A &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}5d6s6p(7/2, 3/2)_2, \\
 B &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}5d6s6p(7/2, 7/2)_0, \\
 C &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}6s^26p_{3/2}(5/2, 3/2)_2, \\
 D &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}5d6s6p(^2D_{5/2})(7/2, 5/2)_2, \\
 E &- 4f^{13}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}6s^26p_{3/2}(5/2, 3/2)_1, \\
 F &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}5d6s6p(^4F_{5/2})(7/2, 5/2)_2, \\
 G &- 4f^{14}6s^2^1S_0 + 2h\nu - 4f^{13}5d6s6p(7/2, 5/2)_1.
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что в область энергии двух квантов, соответствующих положению резонансного максимума G, кроме указанного, попадает еще состояние $4f^{14}6p^2^3P_0$. Однако из-за своего близкого расположения ($\Delta E = 0,2 \text{ см}^{-1}$) они не разрешаются и проявляются в виде одного максимума. Двухфотонный переход, связанный с возбуждением триплета $6p^2^3P_0$, является интеркомбинационным.

Из всех связанных состояний в спектре атом. Yb , попадающих в исследуемую область длин волн и двухфотонное возбуждение которых разрешено правилами отбора, не проявляются в виде резонансных максимумов следующие состояния: $4f^{14}6s8d^3D_1$, $4f^{14}6s9s^3S_1$, $4f^{14}6p^2^3P_1$, $4f^{13}6s^26p_{1/2}(5/2, 1/2)_2$ и $4f^{13}5d6s6p(7/2, 7/2)_1$. Отсутствие резонансных максимумов, обусловленных возбуждением первых трех состояний, может быть связано с тем, что данные

состояния триплетные и соответствующие двухфотонные переходы являются интеркомбинационными. А такие переходы, как показали исследования щелочноземельных атомов [5], проявляются с различной интенсивностью и не во всех областях спектра. Причина же отсутствия резонансных максимумов, связанных с двухфотонным возбуждением состояний $4f^{13}5d6s6p(7/2, 7/2)_1$ и $4f^{13}6s^26p_{1/2}(5/2, 1/2)_2$, в настоящее время неясна.

Наконец, третью группу составляют максимумы a и b , обусловленные трехфотонным возбуждением автоионизационных состояний:

$$\begin{aligned} a &= 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 3h\nu - 4f^{14}5d6f\ ^1P_1^0, \\ b &= 4f^{14}6s^2\ ^1S_0 + 3h\nu - 4f^{13}6s^28d[3/2]_1^0. \end{aligned}$$

Обращает на себя внимание тот факт, что как максимум a , так и максимум b расположены вблизи резонансных максимумов, обусловленных двухфотонным возбуждением связанных состояний (максимумы D и Z соответственно). Является ли это закономерностью или простым совпадением – однозначно ответить в настоящее время мы не можем. Отметим лишь, что похожая ситуация наблюдалась и при трехфотонной ионизации атома бария [6].

Анализ имеющихся данных о спектре автоионизационных состояний атома иттербия [4] показывает, что в случае максимумов B , E и G могут реализовываться последовательные резонансы – двухфотонные с указанными связанными состояниями и трехфотонные с автоионизационными состояниями. Так, тремя фотонами могут возбуждаться автоионизационные состояния: в случае максимума B – $4f^{14}5d6p\ ^1P_1^0$, $4f^{14}6p6d\ ^1P_1^0$ и $4f^{13}6s6p^2[k]_1^0$, максимума E – $4f^{13}5d6s6d[k]_1^0$ и $4f^{13}5d6s[5/2]_{7/2}^0$ и максимума G – $4f^{13}5d6s6d[k]_1^0$ и $4f^{13}5d6s[3/2]_{3/2}^06d[3/2]_1^0$. Трехфотонным возбуждением автоионизационного состояния $4f^{13}5d6s7s[k]_1^0$ может быть обусловлена асимметрия резонансного максимума Z со стороны максимума X .

Следует отметить, что в исследуемую область длин волн попадает около 40 автоионизационных состояний, трехфотонное возбуждение которых разрешено правилами отбора. При этом, как следует из зависимости $N_i(\lambda)$, большая часть из них не проявляется в виде резонансных максимумов. Причина отсутствия таких максимумов в настоящее время неясна. Отметим лишь, что она может быть связана, например, с малой вероятностью трехфотонного возбуждения автоионизационных состояний, сравнимой с вероятностью прямой трехфотонной ионизации в континуум, или с резким уширением автоионизационных состояний в поле $\sim 4 \cdot 10^4$ В/см.

В зависимости $N_i(\lambda)$ нами наблюдался уже упоминавшийся максимум X , который не был идентифицирован переходами ни в спектре связанных, ни в спектре автоионизационных состояний. По своему положению и форме он очень напоминает максимумы a и b , связанные с возбуждением автоионизационных состояний. Это дает основание предполагать, что, возможно, максимум X также обусловлен трехфотонным возбуждением неизвестного автоионизационного состояния, энергия которого ~ 66980 см $^{-1}$.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что в процессе трехфотонной ионизации атома иттербия важную роль играют резонансные переходы, связанные с возбуждением как внешней $6s^2$ -, так и внутренней $4f^{14}$ -подоболочки. Более того, можно утверждать, что наличие $4f^{14}$ -подоболочки у атома Yb приводит к появлению нового (по сравнению со щелочноземельными

атомами) эффективного канала ионизации, связанного с возбуждением одного из электронов этой внутренней оболочки.

-
1. Н.Б.Делоне, Изв. АН СССР, сер. физ. **49**, 471 (1985).
 2. М.А.Ельяшевич, Спектры редких земель, М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит. 1953.
 3. W.C.Martin, R.Zalubas, and L.Hagan, Atomic Energy Levels. NSRDS-NBS-60, 373 (1978).
 4. М.Г.Козлов, Спектры поглощения паров металлов в вакуумном ультрафиолете, М.: Наука, 1981.
 5. Д.Т.Алимов, И.И.Бондар, Ф.А.Ильков, Изв. АН СССР, сер. физ. **52**, 1124 (1988).
 6. И.И.Бондарь, В.В.Суран, Квантовая электроника **17**, 1038 (1990).