

УЖГОРОДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

УДК 539.184

**ГОМОНАЙ Олександр Ілліч**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОФОТОННОЇ ІОНІЗАЦІЇ**  
**АТОМІВ ІТЕРБІЮ**

**Спеціальність 01 04 04. — фізична електроніка**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата фізико-математичних наук**

Ужгород — 1994



00756507 (U)

дисертація є рукопис

Робота виконана у відділі квантової електроніки Інституту електронної фізики НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор ЗАПІСОЧНИЙ Іван Прохорович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор АЛЕКСАХІН Ілля Сергієвич  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник ІЗМАЙЛОВ Ігор Олександрович

Провідна організація: Інститут фізики НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "22" вересня 1994 року на засіданні спеціалізованої вченої ради К 06В.07.02 по фізико-математичним наукам при Ужгородському державному університеті (294000, м. Ужгород, вул. Волошина, 54).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Ужгородського державного університету (вул. Кремлівська, 9).

Автореферат розіслано "15" червня 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради доктор ф.-м. наук, професор

БЛЕЩАН Д.І.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження різноманітних аспектів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною стимулюється як подальшим розитком фізики нелінійних процесів, так і можливістю практичного використання лазерного випромінювання у самих різних областях науки і техніки (атомній і молекулярній фізиці, ядерній технології, медицині, зв'язку, метрології, обробці матеріалів тощо). У всіх випадках застосування лазерного випромінювання має місце його транспортування від джерела до приймача через деяке середовище. При цьому одним з основних каналів втрат випромінювання є багатофотонні процеси: багатофотонне поглинання і багатофотонна іонізація атомів та молекул середовища. Крім цього, сам процес багатофотонної іонізації і, в першу чергу резонансний, є дуже зручним методом дослідження складної атомної структури, який дозволяє одержувати різноманітну інформацію про будову атомів та їх поведінку при взаємодії із зовнішніми полями.

На даний час найбільш детально і систематично процес багатофотонної іонізації досліджено для лужних і лужноземельних атомів. Узагальнення результатів цих досліджень показує, що процес багатофотонної іонізації лужноземельних атомів носить білий складний, порівняно з лужними атомами, характер, зумовлений кореляціями між двома зовнішніми електронами. Відсутність систематичних експериментальних досліджень багатофотонної іонізації більш складних атомів інших груп періодичної системи Д.І.Менделєєва, аналогічних тим, які були виконані для лужних та лужноземельних атомів, не дозволяє зробити якихось узагальнюючих висновків відносно особливостей процесу іонізації у цьому випадку. Тому проведення детальних досліджень для таких атомів становить очевидний інтерес.

У цьому плані цікавими об'єктами є рідкісноземельні атоми. Вони, як і лужноземельні, мають два електрони на зовнішній оболонці. Ускладнення в їх спектрах зумовлено наявністю внутрішньої субвалентної 4f-підоболонки, яка добудовується. Дослідження багатофотонної іонізації таких атомів дозволять, з одного боку, значно доповнити картину взаємодії лазерного випромінювання з атомами, які мають два зовнішні електрони, а з іншого - виявити особ-

ливості, пов'язані з впливом субвалентної 4f-підоболонки на процес багатотонної іонізації рідкісноземельних атомів.

Мета даної роботи полягала в експериментальному дослідженні процесу багатотонної іонізації одного з представників ряду рідкісноземельних елементів – атома ітербій лазерним випромінюванням у широкому спектральному діапазоні та виявленні особливостей цього процесу, пов'язаних із впливом f-підоболонки.

Наукова новизна. Переважна більшість результатів, представлених в дисертаційній роботі, одержана вперше. Вперше експериментально виявлено роль f-підоболонки в процесі багатотонної іонізації атомів і показано, що наявність субвалентної  $f^{14}$ -підоболонки у атома ітербій призводить до появи додаткового ефективного каналу резонансної іонізації. Показано, що у процесі багатотонної іонізації таких складних багатоелектронних атомів, як атом Yb, суттєву роль відіграють як внутрішньоболонкові, так і міжболонкові кореляції електронів. Вперше експериментально визначено абсолютні величини ефективних перерізів три- та шестифотонної іонізації атома ітербій.

Наукова і практична цінність одержаних результатів. Одержані в дисертаційній роботі результати носять, в першу чергу, фундаментальний характер, і є важливими для поглиблення розуміння фізики нелінійної взаємодії лазерного випромінювання з вільними атомами. Головна цінність одержаних результатів полягає в тому, що вони дають нову інформацію про основні характеристики процесу багатотонної іонізації одного з представників ряду рідкісноземельних елементів – атома Yb. Результати даної роботи можуть бути використані для перевірки вірності ріаних теоретичних наближень з метою виявлення найбільш оптимальних методів опису процесу багатотонної іонізації складних багатоелектронних атомів. Одержані в роботі дані можуть бути використані для теоретичних розрахунків спектра невідомих на даний час зв'язаних і автоіонізаційних станів атома Yb. Крім цього, вони також можуть бути використані у широкому колі задач, пов'язаних із селективним впливом лазерного випромінювання на складні багатоелектронні атомні системи.

На захист виносяться:

1. Експериментальна установка для досліджень процесу багатофотонної іонізації атомів металів в умовах лазерного та атомного пучків, які перетинаються.

2. Результати систематичних досліджень залежностей виходу одноварядних іонів ітербій від довжини хвилі лазерного випромінювання  $\lambda^+$  ( $\lambda$ ) у широкому спектральному діапазоні ( $\lambda = 426 + 620$  нм) при рівних значеннях напруженості світлового поля в області взаємодії.

3. Абсолютні величини ефективних перерізів три- та шестифотонної іонізації атома ітербій.

4. Основні положення:

- переважна більшість резонансних максимумів у залежностях  $A^+(\lambda)$  пов'язана з двофотонним (у випадку трифотонної іонізації) та трифотонним (у випадку чотирифотонної іонізації) збудженням зв'язаних станів атома ітербій. При цьому має місце збудження електронів як валентної  $6s^2$ , так і субвалентної  $4f^{14}$ -підоболонки;

- багатоелектронний характер процесу багатофотонної іонізації атома Yb є наслідком як внутрішньооболонкових, так і міжоболонкових кореляцій електронів;

- наявність f-підоболонки у атома Yb призводить до появи нового, порівняно з лужноземельними атомами, ефективного каналу резонансної іонізації: імовірності двофотонного і трифотонного збудження станів конфігурації  $f^{13}nln_1l_1n_2l_2$  є порівнянними з відповідними імовірностями збудження станів конфігурації  $f^{14}nln_1l_1$ ;

- наявність додаткового каналу іонізації, пов'язаного із збудженням f-підоболонки, суттєво не впливає на абсолютні величини багатофотонних перерізів: абсолютні величини три- та шестифотонної іонізації атома Yb є порівнянними з відповідними величинами ефективних перерізів лужноземельних атомів;

- значне конфігураційне перемішування призводить до того, що імовірність двофотонного збудження триплетних станів атома Yb є порівняною з імовірністю двофотонного збудження синглетних станів;

- імовірність трифотонного збудження автоіонізаційних станів з повним моментом  $J=1$  у лазерному полі напруженості  $\mathcal{E} \leq 10^5$  В/см

є малов, порівняно з імовірністю прямого процесу трифотонної іонізації.

Апробація роботи. Результати, представлені в дисертаційній роботі, доповідалися на X Всесоюзній конференції по фізиці електронних та атомних зіткнень (Ужгород, 1988), міжвідомчій нараді по темі "Елементарні процеси в полі лазерного излучения" (Ленінград, 1990), Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (Київ, 1993), XVIII Міжнародній конференції по фізиці електронних та атомних зіткнень (Аргус, 1993), Двілітній конференції Інституту електронної фізики АН України, присвяченій 75-річчю Академії наук України (Ужгород, 1993).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 друкованих працях.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, трьох глав, заключення і списку використаної літератури із 128 найменувань; викладена на 135 сторінках і містить 39 рисунків та 12 таблиць.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації і вибір об'єкта досліджень; сформульовано мету досліджень, а також наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів; викладено основні положення, які виносяться на захист; приведено інформацію про апробацію роботи та опублікування основних результатів.

У першій главі розглянуто основні визначення та загальні закономірності процесу багатифотонної іонізації і зроблено огляд робіт по багатифотонній іонізації атомів металів. Аналіз літературних даних показав, що на даний час найбільш детально і систематично цей процес досліджено у випадку лужних і лужноземельних атомів. Для більш глибокого розуміння фізики багатифотонних процесів є актуальним проведення систематичних експериментальних і теоретичних досліджень для більш складних багатоелектронних атомних систем.

У другій главі детально описано експериментальну установку і

методику проведення досліджень.

Для досліджень процесу багатифотонної іонізації атомів ітербію була створена експериментальна установка, яка складається із наступних основних вузлів: джерела лазерного випромінювання, вакуумної камери з атомним джерелом та системи аналізу, детектування і реєстрації іонів.

Лінійно-поляризоване випромінювання імпульсного барвникового лазера з шириною лінії генерації  $\sim 0,01$  нм фокусувалося у вакуумну камеру, де перетиналося під прямим кутом з пучком досліджуваних атомів ітербію, утвореним за допомогою ефузійного джерела. Концентрація атомів у області взаємодії становила  $\sim 10^{10}$  см $^{-3}$ , а залишковий тиск у вакуумній камері  $\sim 10^{-7}$  Тор. Іони, які утворилися внаслідок багатифотонної іонізації, витягувалися із області перетинання пучків постійним електричним полем у напрямку, перпендикулярному обома пучкам, розділялися за масою та зарядом у часопролітному мас-спектрометрі і детектувалися вторинним електронним помножувачем. Сигнал з помножувача поступав на вхід системи реєстрації, яка дозволяла виділяти і накопичувати корисний сигнал за певну кількість лазерних імпульсів. Довжина хвилі барвникового лазера змінювалася у діапазоні  $\lambda = 426 + 630$  нм. При цьому максимальна величина напруженості світлового поля в області взаємодії не перевищувала  $1,7 \cdot 10^5$  В/см. При таких умовах проведення експерименту опромінення атомів ітербію випромінюванням барвникового лазера призводило до утворення тільки однозарядних іонів. При цьому в залежності від довжини хвилі цей процес вимагав поглинання трьох або чотирьох фотонів.

Окремий розділ присвячено методиці досліджень. У ньому детально описано процедуру вимірювань залежностей виходу іонів ітербію від довжини хвилі та інтенсивності лазерного випромінювання і визначення абсолютних величин ефективних перерізів багатифотонної іонізації; приведено результати досліджень трифотонної іонізації атомів натрію; аналізуються похибки вимірювань.

Третя глава присвячена викладенню результатів експериментальних досліджень та їх обговоренню.

У першому розділі розглянуто спектроскопічні особливості атома ітербію. Відмічено, що його спектр енергетичних рівнів за-

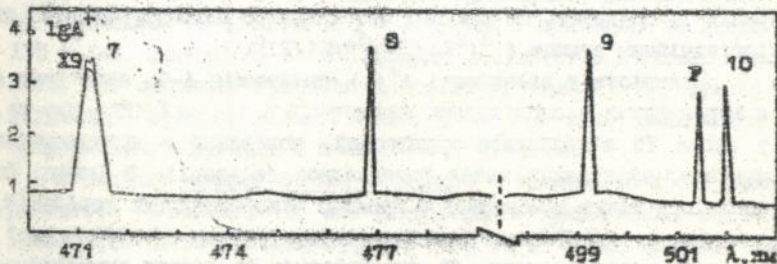
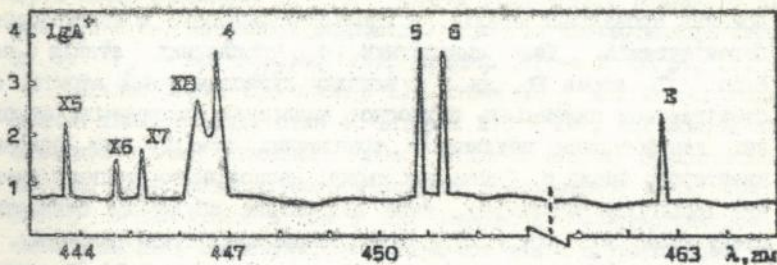
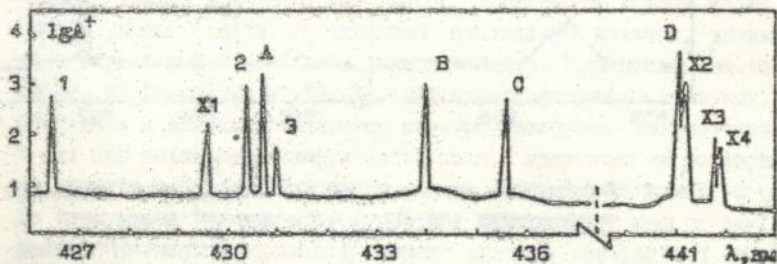
рактизується так званим "простим" спектром, пов'язаним із збудженням тільки зовнішніх 5-електронів, і "складним", який відповідає збудженню одного з електронів внутрішньої  $f^{14}$ -підоболонки.

У другому розділі приведено результати досліджень залежностей виходу одноварядних іонів ітербію від довжини хвилі лазерного випромінювання  $\lambda^+$  при три- та чотирьохфотонній іонізації. У випадку трифотонної іонізації в залежності  $\lambda^+$  спостерігається 28 чітких резонансних максимумів різної амплітуди з ширинами, як правило, порівняними з приведеною шириною спектра лазерного випромінювання (рис.1), які можна умовно розділити на три групи: 1 - максимуми 1-11, зумовлені двофотонним збудженням виключно зовнішньої  $6s^2$ -підоболонки; 2 - максимуми A-G, зумовлені двофотонним збудженням внутрішньої  $4f^{14}$ -підоболонки; 3 - максимуми X1-X10, які не можна однозначно ідентифікувати. Ідентифікація максимумів 1-11 та A-G приведена в табл.1.

Таблиця 1

Максимум	$\lambda, \text{нм}$	$\omega, \text{см}^{-1}$	Резонансний стан	$\omega_n, \text{см}^{-1}$
1	426,50	23446,7	$6s10s \ ^1S_0$	23446,62
2	430,40	23234,2	$6s8d \ ^3D_2$	23233,85
3	430,98	23202,9	$6s8d \ ^1D_2$	23202,81
4	446,81	23380,9	$6p^2 \ ^3P_2$	22380,19
5	450,87	22179,3	$6s7d \ ^3D_2$	22178,81
6	451,32	22157,2	$6s7d \ ^1D_2$	22156,53
7	471,30	21217,9	$6p^2 \ ^3P_0$	21218,47
8	476,89	20969,2	$6s8s \ ^1S_0$	20969,94
9	499,23	20030,9	$6s6d \ ^1D_2$	20030,75
10	502,03	19919,1	$6s6d \ ^3D_2$	19919,53
11	582,24	17175,1	$6s7s \ ^1S_0$	17175,33
A	430,74	23215,9	$f^{13}5d6s6p \ ^5P_2$	23215,7
B	434,01	23040,9	$f^{13}5d6s6p \ ^3P_0$	23040,8
C	435,59	22957,3	$f^{13}6s^26p \ ^3P_2$	22956,9
D	441,12	22669,6	$f^{13}5d6s6p \ ^3F_2$	22669,3
E	462,71	21611,8	$f^{13}5d6s6p \ ^5D_2$	21612,4
F	501,50	19940,2	$f^{13}5d6s6p \ ^5S_2$	19940,1
G	568,23	17598,5	$f^{13}6s^26p \ ^1D_2$	17598,5

У табл.1  $\lambda$  і  $\omega$  - відповідно довжина хвилі і частота, на якій спостерігається максимум,  $\omega_n$  - частота резонансного переходу в спектрі атома Yb.



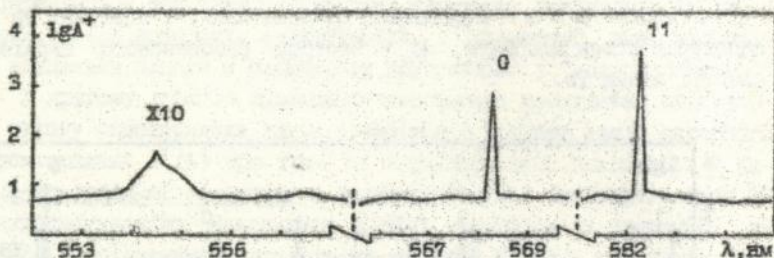


Рис.1. Залежність виходу іонів  $\text{Yb}^+$  від довжини хвилі при трифотонній іонізації ( $\mathcal{E} \approx 4,7 \cdot 10^4$  В/см).

Було виявлено, що амплітуди максимумів, зумовлених двофотонним збудженням триплетних станів, є порівняними з амплітудами максимумів, пов'язаних із збудженням синглетних станів. Це, як показав проведений аналіз, є наслідком значного конфігураційного перемішування. Для синглетних і триплетних станів серії  $6snd \ ^1,^3D_2$  атома  $\text{Yb}$ , як і у випадку лужноземельних атомів, спостерігається залежність відносної амплітуди максимумів, зумовлених двофотонним збудженням триплетних станів, від головного квантового числа  $n$ . Однак при цьому, несподіваним є ризик зменшення амплітуди максимуму, який відповідає збудженню синглетного стану  $6s8d \ ^1D_2$ , яка у 25,8 разів менше амплітуди максимуму, зумовленого збудженням відповідного триплетного  $6s8d \ ^3D_2$  стану. Проведений аналіз показав, що це може бути пов'язано із значним збуренням рівня  $6s8d \ ^1D_2$ , по-перше, за рахунок взаємодії конфігурацій і, по-друге, за рахунок резонансного перемішування з автоіонізаційним станом  $f^{13} ({}^2F_{7/2}) 6s^2 7g(1/2) 1^0$ .

Наявність у залежності  $A^+(\lambda)$  максимумів А-С, амплітуди яких є порівняними з амплітудами максимумів 1-11, свідчить про те, що у атома  $\text{Yb}$  з'являється додатковий, порівняно з лужноземельними атомами, ефективний канал резонансної іонізації. З іншого боку, наявність таких максимумів є проявом міжоболонкових кореляцій. Це означає, що багатоелектронний характер процесу багатифотонної іонізації у випадку атома  $\text{Yb}$  визначається не тільки внутрішньооболонковими, як у випадку лужноземельних атомів, але і міжоболонко-

ними кореляціями електронів.

Неідентифіковані максимуми X1-X10 можуть бути зумовлені як двофотонним збудженням невідомих на даний час зв'язаних станів, так і трифотонним збудженням невідомих автоіонізаційних станів (AIC) з повним моментом  $J=3$ . Однак, відсутність повних даних про спектр таких рівнів не дозволяє однозначно вказати, збудження яких саме з них має місце у даному випадку. Проведений аналіз показав, що максимуми X1-X3, X5, які характеризуються ширинами, порівняними з приведеною шириною спектра лазерного випромінювання, і які при збільшенні напруженості поля  $\mathcal{E}$  практично не розширюються, можуть відповідати двофотонному збудженню зв'язаних станів. Що стосується максимумів X4, X6-X8, X10, ширини яких у декілька разів перевищують приведену ширину спектра генерації і які при збільшенні напруженості  $\mathcal{E}$  мають тенденцію до розширення, то вони можуть бути пов'язані із збудженням AIC з повним моментом  $J=3$ . Крім цього максимуми X8 і X10 можуть відповідати збудженню відомих AIC з  $J=1$  внаслідок відповідно одного та двофотонного переходу  $6p^2 \ ^3P_2 \rightarrow 6p(2p_{3/2})^0 6d(1/2)_1^0$  та  $6s6p \ ^3P_1^0 \rightarrow f^{13}5d^26s \ ^5D_1$ .

Згідно даних про спектр AIC атома Yb у досліджену область довжин хвиль попадає біля 40 відомих AIC з  $J=1$ , які можуть збуджуватись трьома фотонами. Однак, жоден з них не проявляється у вигляді більш-менш чіткого максимуму в залежності  $A^+(\lambda)$  при  $\mathcal{E} \approx 4,7 \cdot 10^4$  В/см. Разом з тим у цій залежності спостерігаються неідентифіковані максимуми, які можна пов'язати з трифотонним збудженням невідомих на даний час AIC, повний момент яких  $J=3$ . Дослідження, виконані при величині  $\mathcal{E} > 4,7 \cdot 10^4$  В/см, виявили появу на деяких довжинах хвиль додаткових максимумів, які можна пояснити збудженням як відомих AIC з  $J=1$ , так і невідомих на даний час AIC з  $J=3$ . Сукупність всіх одержаних результатів дозволяє припустити, що основною причиною відсутності максимумів, зумовлених збудженням великої кількості AIC з  $J=1$ , є мала ймовірність їх трифотонного збудження в полі  $\mathcal{E} < 1,7 \cdot 10^5$  В/см.

У випадку чотирифотонної іонізації в залежності  $A^+(\lambda)$  спостерігається 10 максимумів, які відповідають трифотонному збудженню високолежащих станів конфігурації  $6snp$  та  $f^{13}5d^26s$  (рис.2). Ідентифікація максимумів приведена в табл.2.

Максимум	$\lambda, \text{нм}$	$\omega, \text{см}^{-1}$	Резонансний стан	$\omega_p, \text{см}^{-1}$
a	600,97	16639,8	$f^{13}5d^26s (J=1)$	16640,0
b	601,58	16622,9	$6s18p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16622,4
c	602,57	16595,6	$6s17p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16595,5
d	603,89	16559,3	$6s16p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16559,2
e	605,62	16512,0	$6s15p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16512,1
f	607,87	16450,9	$6s14p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16450,8
g	609,63	16403,4	неідентифікований	-
h	610,87	16370,1	$6s13p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16370,0
i	612,19	16334,8	$f^{13}5d^26s (J=1)$	16335,3
j	615,77	16239,8	$6s12p_{1/2} (1/2, 1/2)_1$	16239,7

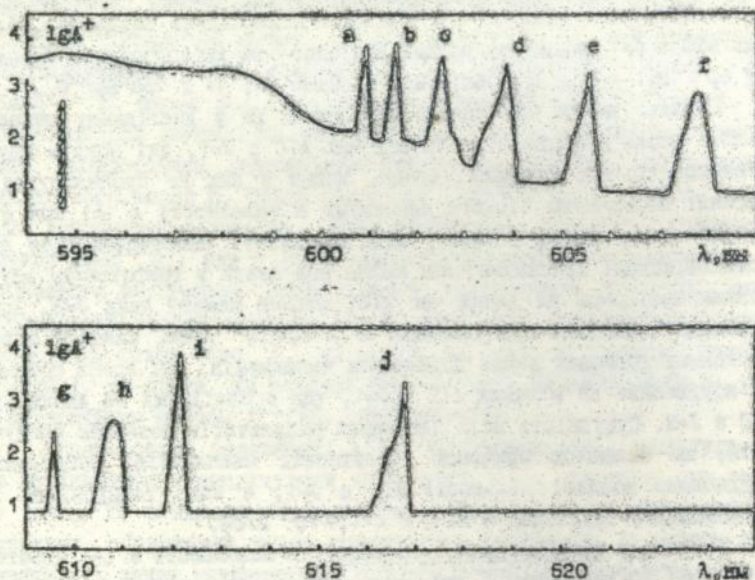


Рис. 2. Залежність виходу іонів  $\text{Yb}^+$  від довжини хвилі при чотирифотонній іонізації ( $\mathcal{E} \approx 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ).

Одержана залежність має дві характерні особливості. Перша - це поступова зміна амплітуд і ширин максимумів, зумовлених збудженням рівнів серії  $6snp_{1/2}$ , по мірі просування у короткохвильову область довжин хвиль. Друга - відсутність максимумів в області довжин хвиль  $\lambda < 600$  нм. Така поведінка залежності  $A^+(\lambda)$  може бути зумовлена двома причинами. По-перше, суттєвим збуренням серії  $6snp_{1/2}$  за рахунок взаємодії конфігурацій. По-друге, зростанням густини рівнів цієї серії в області  $\lambda < 600$  нм.

У третьому розділі приведено результати досліджень залежностей виходу іонів  $Yb^+$  від інтенсивності випромінювання барвникового лазера, а також твердотільного YAG:Nd-лазера ( $\lambda_1=1064$  нм) та його другої гармоніки ( $\lambda_2=532$  нм). У випадку використання випромінювання YAG:Nd-лазера і другої його гармоніки поряд з утворенням однозарядних іонів спостерігалось також утворення двозарядних іонів ітербій. Вихід іонів  $Yb^{2+}$  був на 2+5 порядків меншим виходу іонів  $Yb^+$ . При цьому на обох довжинах хвиль ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) двозарядні іони спостерігалися при таких значеннях інтенсивності лазерного випромінювання, при яких у виході однозарядних іонів мало місце насичення.

У четвертому розділі викладено результати вимірювань абсолютних величин ефективних перерізів три- та шестифотонної іонізації атома Yb. Результати представлені в табл.3. Порівняння одержаних величин з відповідними величинами ефективних перерізів лужкоземельних атомів показало, що у межах точності експерименту вони суттєво не відрізняються.

Таблиця 3

$\lambda, \text{нм}$	$\omega, \text{см}^{-1}$	$k$	$\alpha_k, \text{см}^{2k} \text{с}^{k-1}$	$\alpha_k^{\text{II}}, \text{см}^{2k} \text{с}^{k-1}$
532	18797	3	$10^{-76,8^{+0,7}_{-0,4}}$	$10^{-77,6^{+0,7}_{-0,4}}$
1064	9398	6	$10^{-172,3^{+2,8}_{-1,3}}$	$10^{-175,2^{+2,8}_{-1,3}}$

Примітка.  $\alpha_k, \alpha_k^{\text{II}}$  - ефективні перерізи  $k$ -фотонної іонізації відповідно для немонохроматичного і монохроматичного випромінювання.

У зазначенні формулюються основні результати, одержані в роботі:

1. Розроблено і сконструйовано сучасну експериментальну ус-

тановку для досліджень процесу багатофотонної іонізації атомів металів в умовах лазерного та атомного пучків, які перетинаються.

2. Вперше систематично досліджено процес одноелектронної багатофотонної іонізації атомів ітербій у широкому спектральному діапазоні ( $\lambda = 426 + 630$  нм) в умовах плавної зміни довжини хвилі та відсутності суттєвого збурення енергетичних рівнів. Детально виміряні при цьому залежності виходу однозарядних іонів  $Yb^+$  від довжини хвилі лазерного випромінювання  $A^+(\lambda)$  характеризуються наявністю великої кількості яскраво виражених резонансних максимумів.

3. Встановлено, що переважна більшість спостережуваних максимумів зумовлена:

- у випадку трифотонної іонізації ( $\lambda = 426 + 595$  нм) - двофотонним збудженням зв'язаних станів серій  $6sns$  ( $n = 7, 8, 10$ ),  $6snd$  ( $n = 6+8$ ),  $6p^2 \ ^3P_{0,2}$ ,  $f^{13}5d6s6p$  і  $f^{13}6s^26p$ ;

- у випадку чотирифотонної іонізації ( $\lambda = 595 + 630$  нм) - трифотонним збудженням зв'язаних станів серій  $6snp_{1/2}$  ( $n = 12+18$ ) і  $f^{13}5d^26s$ .

4. Наявність у залежності  $A^+(\lambda)$  максимумів, пов'язаних із збудженням двоелектронних станів  $6p^2 \ ^3P_{0,2}$  "простого" спектра, а також станів конфігурацій  $f^{13}5d6s6p$ ,  $f^{13}6s^26p$  і  $f^{13}5d^26s$  "складного" спектра свідчить про те, що у випадку атома  $Yb$  суттєву роль відіграють як внутрішньооболонкові, так і міжоболонкові кореляції електронів.

5. Виявлено, що імовірність двофотонного збудження триpletних станів атома  $Yb$  є порівняною з імовірністю двофотонного збудження синглетних станів, що є наслідком значного конфігураційного перемішування.

6. У залежності  $A^+(\lambda)$  спостерігаються максимуми, які не можна одночасно ідентифікувати. Вони можуть бути зумовлені як двофотонним збудженням зв'язаних станів, так і трифотонним збудженням автоіонізаційних станів з повним моментом  $J=3$ , дані про які на даний час відсутні.

7. У залежності  $A^+(\lambda)$  не спостерігаються максимуми, пов'язані з трифотонним збудженням великої кількості відомих автоіонізаційних станів з повним моментом  $J=1$ . Результати досліджень пове-

дінки залежності  $A^+(\lambda)$  при різних значеннях напруженості світлового поля дозволяють припустити, що можливою причиною відсутності таких максимумів є мала ймовірність трифотонного збудження автоіонізаційних станів у полі напруженості  $E < 1,7 \cdot 10^5$  В/см.

8. Досліджено залежності виходу однозарядних іонів ітербію від інтенсивності випромінювання барвникового лазера при трифотонній іонізації. У всіх випадках експериментально визначені величини степеня нелінійності співпадають з кількістю фотонів  $k=3$ , яку необхідно поглинути атому Yb для іонізації згідно закону збереження енергії.

9. Досліджено залежності виходу одно- та двошарядних іонів ітербію від інтенсивності випромінювання твердотільного YAG:Nd-лазера ( $\lambda = 1064$  нм) та його другої гармоніки ( $\lambda = 532$  нм). Для однозарядних іонів експериментально виміряні степені нелінійності в обох випадках співпадають з кількістю фотонів, яку необхідно поглинути атому Yb для іонізації, виходячи із закону збереження енергії. Для двошарядних іонів експериментально визначені степені нелінійності в обох випадках у межах точності експерименту дорівнюють кількості фотонів, яка є необхідною для утворення двошарядного іона з основного стану одношарядного іона.

10. Вперше експериментально виміряно абсолютні величини ефективних перерізів три- та шестифотонної іонізації атома Yb:

$\sigma_3^M = 10^{-77,6^{+0,7}_{-0,4}} \text{ см}^6 \text{ с}^2$  і  $\sigma_6^M = 10^{-175,2^{+2,8}_{-1,3}} \text{ см}^{12} \text{ с}^6$ . У межах точності експерименту вони суттєво не відрізняються від відповідних величин ефективних перерізів лужноземельних атомів.

11. Виявлено, що основні закономірності процесу багатифотонної іонізації атома ітербію і лужноземельних елементів є подібними. Однак наявність і-підоболонки у атома Yb призводить до появи нового, порівняно з лужноземельними атомами, ефективного каналу резонансної іонізації. Разом з тим, наявність такого додаткового каналу іонізації суттєво не впливає на величину багатифотонних перерізів.

Основні результати роботи викладено у наступних друкованих працях:

1. Гомонай А.М., Запасочний М.П., Кельман В.А. Експериментальна

- установка "Когерент" для исследования процесса нелинейной ионизации атомов // Тез. докл. на X Всесоюзной конф. по физике электронных и атомных столкновений (Ужгород, 3-4 октября 1988). - Ужгород, 1988. - Ч.II. - С.148.
2. Трехфотонная ионизация атомов натрия / А.И.Гомонай, И.П.Запесочный, В.А.Кельман, Д.Д.Сикора // Укр.физ.журн. -1991, -Т.36, вып.5. -С.675-679.
  3. Gomonaï A.I., Zapesochny I.P. Three-Photon Ionisation of Ytterbium // Abstr.of Contr.Papers of XVIII Int.Conf.on the Physics of Electronic and Atomic Collisions (Aarhus University, Denmark, 21-27 July 1993). Aarhus, 1993. - Vol.1. - P.103.
  4. Gomonaï A.I., Zapesochny I.P. Three- and Four-Photon Ionisation of Ytterbium Atom // Proc.Contr.Papers of Int.Conf."Physics in Ukraine" (Kiev, 22-27 June 1993). - Kiev, 1993. - Radiophysics and Electronics. - P.107-109.
  5. Гомонай А.И., Запесочный И.П. Резонансное возбуждение связанных и автоионизационных состояний атома иттербия в процессе трехфотонной ионизации // Письма в ЖЭТФ. -1993. -Т.57, вып.12. -С.765-768.
  6. Гомонай А.И. Экспериментальное наблюдение двухфотонных резонансов при трехфотонной ионизации атома иттербия // Письма в ЖТФ. -1993. -Т.19, вып.11. -С.12-14.
  7. Гомонай А.И., Запесочный И.П. Особенности четырехфотонной ионизации атома иттербия излучением перестраиваемого лазера в диапазоне 594-617 нм // Опт.и спектр. - 1993. - Т.75, вып.5. -С.963-965.
  8. Гомонай О.І., Запесочний І.П. Трифотонне збудження автоіонізаційних станів атома ітербій // Збірник доп. всвілейної конф. (75 років АН України) ІЕА-93 (Ужгород, 29-30 вересня 1993). - Ужгород, 1993. - С.157-159.
  9. Гомонай О.І. Збудження автоіонізаційних станів при нелінійній фотолінійній іонізації атома ітербій // Укр.физ.журн. -1994. -Т.39, №3. -С.294-295.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України



457576

713 30.535  
**АВ 30.535**