

ЗБУДЖЕННЯ ІНТЕРКОМБІНАЦІЙНОЇ ЛІНІЇ In^+ ПРИ ЕЛЕКТРОН-ІОННИХ ЗІТКНЕННЯХ

Є.В.Овчаренко

Інститут електронної фізики НАН України,
вул. Університетська 21, Ужгород, 88017
e-mail: dep@mail.uzhgorod.ua

Спектроскопічним методом в умовах пучків, що перетинаються, досліджено функцію збудження інтеркомбінаційної лінії In^+ $\lambda 230.6$ нм ($5s5p\ ^3P^{\circ}_1 \rightarrow 5s^2\ ^1S_0$) при зіткненні іонів з повільними електронами в діапазоні енергій $5 \div 80$ еВ. На енергетичній залежності виявлено структурні особливості, зумовлені сумарним внеском резонансних процесів за рахунок утворення автоіонізаційних станів атомів In та їх електронного розпаду безпосередньо або через каскадні переходи на $5p\ ^3P^{\circ}_1$ -рівень іона In^+ .

Вступ

Актуальність дослідження взаємодії електронів з атомами та іонами пов'язана з тим, що дані про елементарні процеси, які відбуваються при таких зіткненнях, є важливими для розвитку різних напрямків сучасної фізики та нової техніки: фізики плазми, лазерної техніки, астрофізики та ін.

Серед цих елементарних процесів значне місце займають непружні процеси при електрон-іонних зіткненнях. Важливі фундаментальні результати з їх дослідження було отримано для іонів інертних газів [1], лужних [2] і лужноземельних [3] металів та іонів підгрупи цинку [4]. Для іонів підгрупи алюмінію такі дослідження проведено лише зі збудження резонансного переходу [5] та іонізації іона Ga^+ , а також зі збудження інтеркомбінаційного переходу [6], бейтлерівських рівнів [7] та діелектронної рекомбінації іона Tl^+ [8]. Отримані результати вказують на складний механізм їх збудження, що пов'язано зі значним вкладом резонансних процесів та впливом релятивістських і кореля-

ційних ефектів. Найбільший вплив цих ефектів було виявлено при вивченні збудження інтеркомбінаційної лінії іона Tl^+ [6]. Тому для визначення того, як ускладнення будови електронних оболонок іонів у підгрупі алюмінію впливає на закономірності та особливості їх збудження, актуальним є дослідження електронного збудження іона In^+ . Однак такі дослідження пов'язані з певними експериментальними труднощами, які зумовлені фізичними властивостями цього металу. Насамперед це висока температура випаровування та низька температура плавлення ($t_{\text{пл}} = 156^{\circ}\text{C}$), що призводить до необхідності значного вдосконалення різних вузлів експериментальної установки.

Тому метою даної роботи була підготовка експерименту з дослідження непружних зіткнень електронів з іонами In^+ на установці "ІОН" та отримання даних з електронного збудження інтеркомбінаційного переходу $5s5p\ ^3P^{\circ}_1 \rightarrow 5s^2\ ^1S_0$ іона In^+ . Для досягнення поставленої мети необхідно було вдосконалити деякі вузли як джерела іонів, так і електронної гармати.

**Експериментальна установка
та методика досліджень**

Експеримент був проведений на установці "ІОН" [7], схему якої наведено на рис.1. Установка складається з джерела іонів 1, в якому пари атому In утворюються шляхом випаровування при нагріванні в резервуарі і, проходячи канал ($\varnothing 2$ мм, $l=20$ мм), потрапляють в іонізаційну камеру, де відбувається їх іонізація на розжареній торіваній вольфрамовій спіралі діаметром 1,5 мм (3–4 витки), виготовленій з дротину діаметром 0,2 мм. Іони витягуються з джерела та фокусуються іонно-оптичною системою лінз з конічними вставками, між якими знаходяться керамічні ізолятори. Для відокремлення іонів від атомів, що дифундують з іонного джерела, використовується 90° електростатичний конденсаторний селектор іонів 2, зовнішня обкладка якого виготовлена з вольфрамової сітки. Атоми In, що пройшли крізь сітку, вловлюються пасткою атомів 3, яка охолоджується. Іони прискорюються до необхідної енергії між катодом і входною заземленою щілиною електростатичного конденсатора та завертаються в ньому на 90° . Проходячи еквіпотенціальну область зіткнення, вони детектуються глибоким циліндром Фарадея 4. Щоб зменшити можливість рекомбінації іонів на поверхні вихідної щілини та потрапляння атомів в область зіткнень, вихідну щілину виготовлено з тонкої пластинки у вигляді зрізаної піраміди. Для затримки вибитих із детектора іонним пучком вторинних електронів та розсіяних електронів з області зіткнень використовується охоронний електрод, встановлений перед входом пучка в детектор, на який подається від'ємний потенціал.

В умовах вакууму $\approx 10^{-8}$ Тор, що забезпечується засобами безмасляної відкачки, в еквіпотенціальній області зіткнень іонний пучок перетинається з електронним під прямим кутом. Електронний стрічковий пучок (1×10 мм²) отримується за допомогою триелектродної електронної

гармати 5, і, пройшовши область зіткнень, детектується циліндром Фарадея 6. Для затримки вторинних електронів на вході детектора встановлено охоронний електрод.

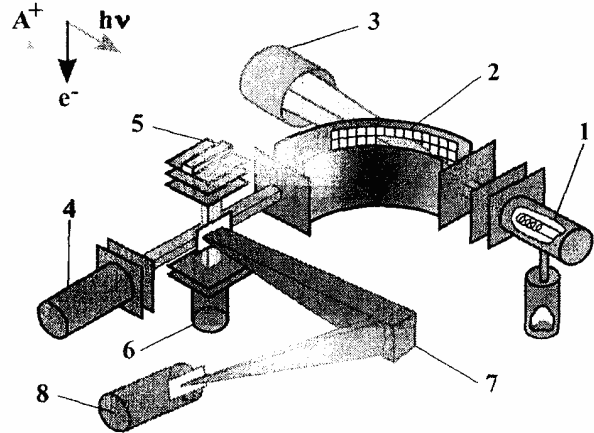


Рис.1. Схема експерименту.

Випромінювання з області зіткнень спостерігається під прямим кутом до площини перетину пучків і спектрально розділяється дифракційною ґраткою 7 вакуумного монохроматора ВМ-70, зібраного за схемою Сейя-Наміока. Як детектор випромінювання 8 використовується сонячносліпий фотоелектронний помножувач ФЭУ-142, який працює в режимі підрахунку окремих імпульсів і додатково охолоджується для зменшення темного фону. Виділення корисного сигналу здійснюється автоматизованою модуляційною системою реєстрації та модулями КАМАК, що керуються персональним комп'ютером. Створений комплекс експериментальної апаратури дозволяє проводити прецизійні дослідження функцій збудження, спектрів випромінювання, вольт-амперних характеристик (ВАХ) та кривих затримок електронів за енергією.

Основна проблема дослідження електронного збудження іона In^+ пов'язана з роботою джерела іонів і зумовлена високою температурою випаровування та низькою температурою плавлення індію. Для отримання необхідного тиску насичених парів атома In ($10^{-3} \div 10^{-2}$ Тор) та стабільної роботи іонного джерела не-

обхідно досягти температури нагрівання резервуара $\approx 1000^\circ\text{C}$. З цією метою встановлено багат шарові теплові екрани навколо резервуара та іонізаційної камери. Підвищення температури призводить до необхідності проведення додаткового екранування керамічних ізоляторів та збільшення відстані між електродами іонно-оптичної системи. Це дає змогу значно зменшити ймовірність пробойів. Для збільшення величини іонного струму експериментально підібрано оптимальну відстань між іонізатором і витягуючим електродом, а також режими нагрівання іонізатора, резервуара та іонізаційної камери. Після проведених вдосконалень при енергії $E_i = 600$ eV іонний струм склав $I_i = (0,6 \div 0,8) \times 10^{-6}$ А.

Оскільки час життя інтеркомбінаційного переходу становить $\tau \approx 115$ нс, значна частина випромінювання виноситься за межі області спостереження. У той же час, при енергії, що відповідає порогу збудження інтеркомбінаційної лінії ($E = 5,37$ eV [9], рис. 2), електронна гармата не дає достатньої величини електронного струму. З метою збільшення струму електронної гармати при малих енергіях відстань між катодом і першим фокусуючим анодом було зменшено, а для зменшення провисання електричних полів на щілині анодів приварено вольфрамові сітки з високою прозорістю. Це призвело до збільшення електронного струму, який в енергетичному інтервалі $E_e = (5 \div 80)$ eV становив $(7 \div 20) \times 10^{-5}$ А.

Для вибору режиму живлення електронної гармати проводились виміри серій ВАХ та кривих затримки електронів за енергією. На рис.3 наведено ВАХ при налаштуванні електронної гармати на енергію $E_e = 5$ eV та потенціалі на фокусуючому аноді $U_1 = 14$ В. Для таких самих режимів проведено виміри кривих затримки (рис. 4), з яких методом диференціювання визначено моноенергетичність електронного пучка. Як видно з рисунка, при напрузі $U_{np} = 10$ В ВАХ виходять на насичення, ширини відповідних кривих розподілу електронів за енергією на напів-

висоті становлять $\Delta E_{1/2} \approx 0,55$ eV та має місце незначне зміщення їх максимумів.

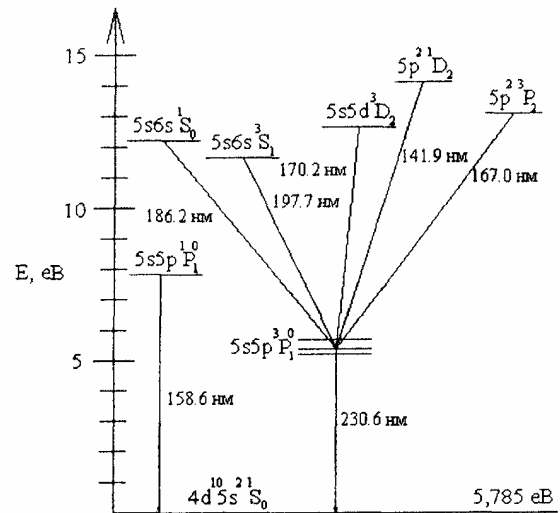


Рис. 2. Енергетичні рівні іона In^+ .

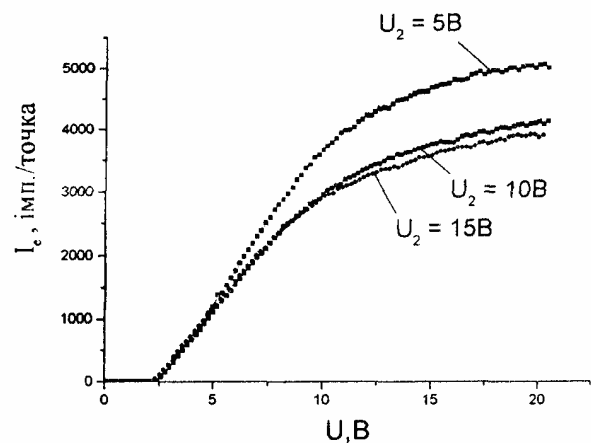


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики електронної гармати.

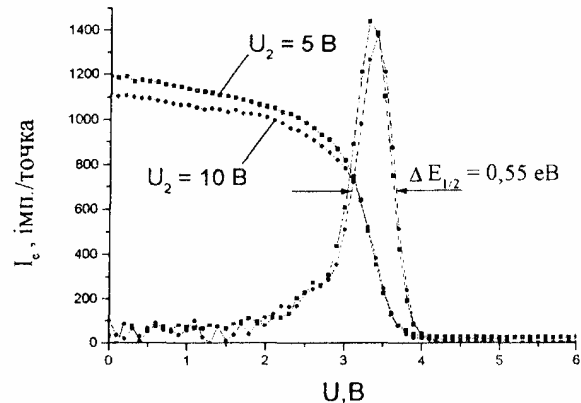
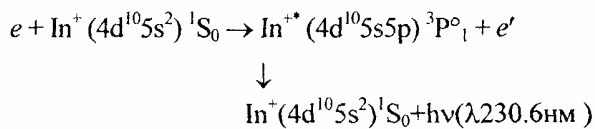


Рис.4 Криві затримки електронів за енергією та моноенергетичність електронної гармати.

Результати досліджень та їх обговорення

Проведені вдосконалення дали можливість дослідити процес електронного збудження інтеркомбінаційного переходу іона In^+ , що відбувається за наступною реакцією:



Результати досліджень, проведені в енергетичному інтервалі від порогу збудження до 80 еВ наведено на рис.5. Від порогу збудження до енергії $E_e = 20$ еВ виміри проводилися з кроком зміни прискорюючої енергії $\Delta E_e = 0,5$ еВ, від 20 еВ до 60 еВ – з кроком 1 еВ, вище 60 еВ – з кроком 5 еВ. Стрілками показано поріг збудження інтеркомбінаційної лінії (5,37 еВ) та потенціал іонізації іона In^+ (18,86 еВ). Вертикальними відрізками показано середньоквадратичні похибки відносних вимірів. На графіку нанесено також положення вищих енергетичних рівнів іона In^+ , з яких можливе заселення ${}^3P^{\circ}_1$ -рівня і до яких збігаються автоіонізаційні стани (АІС) атома In.

Як видно з рисунку, починаючи з енергії $E_e = 5$ еВ, спостерігається різкий ріст функції збудження, яка досягає максимуму при енергії $E_e = 8,5$ еВ. Виявлені структурні особливості на функції збудження пов'язані з сумарним вкладом ре-

зонансних процесів: до енергії $E_e = 10$ еВ резонансний вклад обумовлений безпосереднім розпадом АІС на ${}^3P^{\circ}_1$ -рівень, а при вищих енергіях – або безпосереднім розпадом АІС, або через можливі каскадні переходи.

При таких параметрах та умовах експерименту нам не вдалося більш чітко розділити структуру на функції збудження інтеркомбінаційної лінії. Для цього необхідно провести більш прецизійні дослідження з меншим кроком зміни енергії (0,05÷0,1 еВ) і кращою моноенергетичністю ($\Delta E_{1/2} \approx 0,3$ еВ).

Висновки

Проведені вдосконалення іонного джерела та електронної гармати дали можливість вперше вивчити збудження інтеркомбінаційної лінії іона In^+ при електрон-іонних зіткненнях. Отримані результати вказують на складний механізм процесу збудження: крім прямого збудження, суттєвий внесок дають резонансні процеси, які відбуваються через АІС атома. Для більш глибокого вивчення цих процесів слід провести прецизійні виміри при покращених умовах експерименту.

Автор висловлює подяку Імре А.Й., Гомонай Г.М., Гутичу Ю.І., які допомагали в модернізації експериментальної установки та проведенні досліджень.

Література

1. А.И.Запесочный, А.И.Имре, Я.Н.Семенов, ЖЭТФ 99, 721 (1991).
2. А.И.Запесочный, А.И.Имре, И.С.Александрин, И.П.Запесочный, О.И.Зацаринный, ЖЭТФ 90, 1972 (1986).
3. И.П.Запесочный, А.И.Имре, А.И.Дашченко, В.И.Фронтов, ЖЭТФ 100, 113 (1991).
4. А.И.Имре, А.Н.Гомонай, В.С.Вукстич, А.Н.Немет, Письма в ЖЭТФ 68, 614 (1998).
5. G.Stefani, R.Camilloni, G.H.Dunn, W.T.Rogers, Phys.Rev.A 25, 2996 (1982).
6. И.П.Запесочный, А.И.Имре, Е.Э.Контрош, А.И.Запесочный, А.Н.Гомонай, Письма в ЖЭТФ 43, 463 (1986).

7. Г.М.Гомонай, А.Й.Имре, УФЖ 41, 1032
(1996).

8. А.Н.Гомонай, А.И.Имре, Е.Э.Контрош,

Оптика и спектроскопия 81, 29 (1996).

9. H. Karlsson, U.Litzen, J.Phys.B: At. Mol.
Opt. Phys.34, 4475 (2001).

EXCITATION OF In^+ INTERCOMBINATION LINE BY ELECTRON-ION COLLISION

E.V.Ovcharenko

Institute of Electron Physics, Ukrainian Academy of Sciences,
21 Universytetska str., Uzhhorod 88017, Ukraine,
e-mail: dep@mail.uzhgorod.ua

The excitation function for the intercombinational line at the collision of ions with slow electrons in the energy range 5–80 eV is studied by spectroscopic method using the crossed-beam technique. Structural features at the energy dependence are revealed, caused by the total contribution of resonance processes due to the formation of In atom autoionizing states and their electronic decay directly or via cascade transitions to the level of In^+ ion.