ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 4, № 4 (2000) с. 415–418

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 4, No. 4 (2000) p. 415–418

НАДПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА МЕТАСТАБІЛЬНИХ АТОМАХ МАГНІЮ

І. І. Шафраньош, В. І. Марушка
Ужгородський національний університет, кафедра квантової електроніки, вул. Волошина, 54, Ужгород, UA-88000, Україна

(Отримано 6 вересня 1999 р.; в остаточному вигляді — 25 грудня 2000 р.)

Здійснено експериментальне вивчення процесу надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах магнію. Дослідження проведено з використанням електронного спектрометра в умовах електронного й атомного пучків, що перетинаються. Уперше отримано енерґетичну залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів та його абсолютну величину.

Ключові слова: електронний спектрометр, трохоїдний електронний монохроматор, надпружне розсіяння електронів, ефективний переріз, енерґетична залежність ефективного перерізу, метастабільні стани атома.

PACS numbers: 34.80.–i, 34.90+q

Необхідність ліпшого розуміння процесів зіткнень за участю електронів і збуджених атомів диктується не лише важливою роллю, яку вони відіграють у побудові фундаментальних фізичних моделей, але й тим, що їх вивчення забезпечує дані, які можна безпосередньо застосувати в ділянках, де величини концентрацій збуджених атомів є значними, наприклад, у плазмовому середовищі. Серед усієї сукупности цих процесів помітно виділяється явище надпружного розсіяння електронів збудженими атомами, насамперед своїм особливим механізмом передачі енерґії. Мова йде про збільшення кінетичної енерґії поступального руху налітаючого електрона внаслідок передачі йому внутрішньої енерґії збудження атома в процесі взаємодії і зумовлений цим перехід атома в нижчий енерґетичний стан. Саме ця ознака надпружного процесу і робить його дуже цікавим предметом дослідження. Над установленням характеристик та механізмів перебігу цього явища впродовж останнього десятиріччя активно працюють різні дослідницькі школи. Однак, незважаючи на інтенсивні дослідження, процес надпружного розсіяння електронів збудженими атомами поки що залишається невивченим. Майже відсутні дані, що стосуються основної характеристики перебігу явища — ефективного перерізу надпружного процесу. Є лише поодинокі спроби встановлення величин диференціяльного ефективного перерізу процесу надпружного розсіяння електронів на лазерно збуджених атомах натрію [1,2] та визначення коефіцієнтів швидкости реакції, а на їх основі — знаходження усереднених значень перерізу надпружного розсіяння електронів на газорозрядно збуджених атомах інертних газів [3,4] та атомах ртуті [5].

У цьому повідомленні викладено постановку наших досліджень з надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах магнію та отримані результати.

Експерименти були виконані в умовах електронного та атомного пучків, що перетинаються під прямим кутом із використанням електронного спектрометра (див. рис. 1). Останній складався з джерела моноенерґетичного пучка електронів реґульованих енерґій, аналізатора енерґій розсіяних електронів та системи реєстрації.

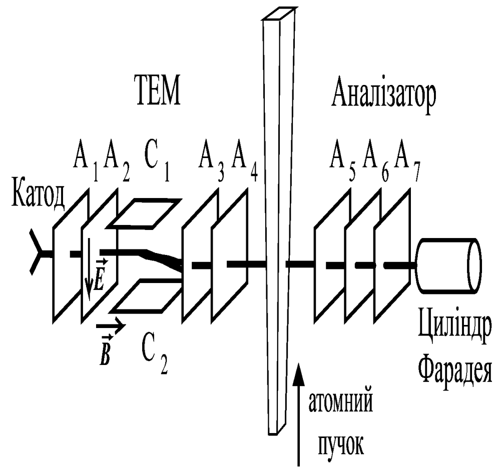

Рис. 1. Електронний спектрометр: К — катод; A_1–A_4 — електроди ТЕМа; C_1, C_2 — відхиляючі пластини ТЕМа; A_5–A_7 — електроди аналізатора; **E**, **B** — вектори напружености електричного та індукції магнетного полів.

Моноенерґетичний пучок електронів ґенерувався трохоїдним електронним монохроматором (ТЕМом), у якому селекція електронів за енерґіями здійснюється у взаємоперпендикулярних електричному та магнетному полях. Конструкцію використаного в роботі ТЕМа розробив О. Шпеник із співробітниками [6] на основі піонерської роботи А. Статовича й Дж. Шульца [7]. Зауважимо, що використання трохоїдних монохроматорів раніше дозволило отримати нові дані з пружного розсіяння електронів на атомах в основному стані [8]. На сьогодні відомі вдосконалені варіянти ТЕМів [9].

Конструкційні особливості та головні параметри використаного ТЕМа є такими. Емітером електронів служив V-подібний катод із торованого вольфраму. Електроди A_1–A_4 виготовлені з нержавіючої немагнетної сталі. Потенціял електрода A_4 (прискорювальний потенціял V_p) визначає енерґію електронів, які взаємодіють з метастабільними атомами в еквіпотенціяльній ділянці між електродами A_4 та A_5. Напруженість електричного поля $\mathbf{E}$ та індукція магнетного поля $\mathbf{B}$ складали відповідно $\sim 1.2{\cdot}10^2$ В/м і $\sim 1.5{\cdot}10^{-2}$ Тл. Енерґетична неоднорідність пучка ТЕМа була $\sim$0.1 еВ (на піввисоті розподілу) для енерґії 2 еВ при силі струму пучка $\approx 2{\cdot}10^{-8}$ А.

Використання ТЕМа дало змогу суттєво просунутися в ділянку малих енерґій порівняно з нашою попередньою працею [10], де як джерело моноенерґетичного пучка електронів використано п'ятиелектродну електронну гармату.

Аналізатор енерґій розсіяних електронів (див. рис. 1) був гальмівного типу і являв собою систему з трьох плоских електродів (A_5, A_6, A_7) з круглими діяфрагмами. Потенціяли крайніх електродів однакові й дорівнювали пришвидшувальному потенціялові V_p, а на середній електрод подавався затримувальний потенціял V_r. Роздільність аналізатора при енерґії 2 еВ досягає величини $5{\cdot}10^{-2}$.

Система реєстрації електронів, які пройшли аналізатор, працювала в аналоговому режимі і складалася з електрометра типу В7–30 та двокоординатного ("X–Y") самописця.

Для одержання пучка метастабільних атомів магнію в експериментах був використаний розрядний спосіб збудження. Його суть полягає в тому, що отриманий термічним ефузійним способом пучок атомів Mg в основному стані проходить через розрядну камеру, де під дією електронів розряду атоми конвертуються у збуджені стани. Короткоживучі збуджені стани розпадаються на місці їх утворення, а сформований колімувальними щілинами і очищений електричним полем конденсатора пучок атомів магнію, який містить атоми в основному та метастабільних станах, проходить через ділянку взаємодії з електронним пучком. Повніше методику отримання пучка метастабільних атомів описано в праці [11].

В умовах виконаних досліджень параметри атомного пучка в ділянці взаємодії його з пучком електронів були такими: концентрація метастабільних атомів Mg станах $3s3p\ {}^3P_{0,2}$ складала $\approx 6{\cdot}10^{15}$ м$^{-3}$, концентрація атомів Mg в основному стані $3s^2\ {}^1S_0$ дорівнювала $\approx 5{\cdot}10^{16}$ м$^{-3}$, кут розходження атомного пучка становив $\sim 8.7{\cdot}10^{-2}$ рад.

Джерела електронного та атомного пучків, аналізатор електронів були закріплені на збірному фланці, який поміщений усередині камери зіткнень, зробленої з нержавіючої сталі. Підготовка до вимірювань уключала в себе тривале прогрівання й очищення в умовах високого вакууму поверхонь електродів ТЕМа та аналізатора електронів. Робочий вакуум створювали вакуумною системою помпування, яка мала форвакуумну, масляну та магнеторозрядну помпи. Дослідження проводили при вакуумі $\sim 6.5{\cdot}10^{-6}$ Па.

Процедура експериментальних вимірів була такою. На електрод A_4 ТЕМа та паралельно на вхід "X" двокоординатного самописця подавали лінійно зростаючий потенціял V_p. При цьому до середнього електрода аналізатора A_6 прикладали від'ємний (щодо катода ТЕМа) потенціял V_r. Такий потенціяльний бар'єр можуть подолати лише надпружно розсіяні електрони, проекція вектора швидкости $\mathbf{v}$ яких на вісь аналізатора задовольняє умову:

$$\frac{mv^2}{2}\cos^2\alpha > eV_r. \tag{1}$$

Для нашого випадку

$$\frac{mv^2}{2} = eV_p + E^m,$$

де e, m та E^m — відповідно заряд і маса електрона та енерґія збудження метастабільного стану атома, v — швидкість електрона, α — кут розсіяння. Наявність магнетного поля приводить до того, що розсіяні електрони під кутом $\alpha < \frac{\pi}{2}$ будуть рухатися спіральними траєкторіями (трохоїдами) у напрямку до електрода A_5 аналізатора. Для умов наших експериментів радіус трохоїди надпружно розсіяного електрона, на кут близький до $\frac{\pi}{2}$, менший від радіуса вхідної діяфрагми аналізатора ($4{\cdot}10^{-4}$ м), що дозволяє їм пройти в ділянку дії гальмівного поля. Це в свою чергу означає, що кутова апертура аналізатора визначатиметься вже не тільки його геометрією, але й величиною затримувального потенціялу V_r (див. умову (1)). Наприклад, для значень $V_r = -2$ В та $V_p = 0.15 \div 2$ В α лежить у межах 0.4–0.5 рад.

Струм надпружно розсіяних електронів i_s, що пройшли аналізатор, реєстрували приладом В7–30, вихідний сиґнал з якого поступав на вхід "Y" двокоординатного самописця. Таким чином, отримували графічну залежність $i_s(V_p)$. Якщо до середнього електрода аналізатора прикладемо пришвидшувальний потенціял V_p, то отримаємо залежність $i_0(V_p)$ (вольт-амперну характеристику ТЕМа). Відношення $i_s(V_p)/i_0(V_p)$ з урахуванням коефіцієнта пропускання аналізатора k визначає енерґетичну залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів Q^s (у відносних одиницях) у межах кутів розсіяння, які визначаються значеннями V_r, про що йшлося вище. Коефіцієнт k зумовлений, головним чином, неоднаковими умовами проходження через аналізатор надпружно розсіяних електронів (при $V_r = -2$ В) та електронів первинного пучка (при $V_r = V_p$). Знаходження k йшло таким шляхом. За умови подачі на електрод аналізатора A_6 потенціялу V_r, який лінійно спадав від потенціялу V_p до потенціялу катода V_k, записували криві затримки струму електронного пучка $i_0(V_r)$. Очевидно, що відношення ординати $i_0(V_r)$ до ординати $i_0(V_r = V_p)$ буде характеризувати пропускання аналізатора для даних значень V_p і V_r, тобто $k = i_0(V_r)/i_0(V_r = V_p)$. Для умов наших експериментів k змінювалося в межах $0.8 \div 0.7$.

Для визначення абсолютної величини перерізу надпружного розсіяння Q^s ми виходили з виразу:

$$i_s = i_0 N^m Q^s l k, \tag{2}$$

де i_s — струм надпружно розсіяних електронів в ділянці кутів $\pm\alpha$, i_0 — струм первинного електронного пучка, N^m — концентрація метастабільних атомів, l — шлях електронного пучка в атомному пучку, k — коефіцієнт пропускання аналізатора.

Знаходження необхідних складових виразу (2) проходило так. Струми i_s та i_0 вимірювали безпосередньо електрометром. Для обчислення величини N^m вимірювали струм йонів, зумовлений йонізацією метастабільних атомів. Методика таких вимірів описана у праці [11]. Величина йонного i_i струму дорівнює:

$$i_i = i_{0m} N^m Q_i l, \tag{3}$$

де i_{0m} — струм електронного пучка, Q_i — переріз йонізації метастабільних атомів. Із відношення (2) до (3) отримаємо:

$$Q^s = \frac{i_s i_{0m}}{i_i i_0} Q_i k^{-1}. \tag{4}$$

Значення для Q_i взято з праці [11].

У проведених експериментах ми вперше встановили енерґетичну залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах магнію та його абсолютну величину. Енерґетична залежність перерізу надпружного розсіяння наведена на рис. 2, де по осі абсцис відкладено енерґію електронів в одиницях еВ, а по осі ординат — значення перерізу у відносних одиницях. Відносна похибка у визначенні відносної величини Q^s складала $\sim$8%. Звертає на себе увагу різкий ріст перерізу надпружного розсіяння в ділянці енерґій, менших від 1 еВ. Абсолютна величина перерізу надпружного розсіяння була обчислена для енерґії налітаючих електронів 0.5 еВ і складала $3 \cdot 10^{-20}$ м^2. Під Q^s слід розуміти частину інтеґрального перерізу надпружного розсіяння електронів, яка визначається кутом розсіяння α. Відносна похибка у визначенні абсолютної величини Q^s складала 60%.

Атом магнію має два триплетні метастабільні стани $3s3p\ ^3P_0$, $3s3p\ ^3P_2$ з енерґіями збудження відповідно 2.71 еВ, 2.72 еВ. Обидва ці метастабільні стани були присутні в атомному пучку, а відношення їх концентрацій складало $N^m(3s3p\ ^3P_0)/N^m(3s3p\ ^3P_2) \approx 1/5$. У результаті надпружного розсіяння атоми з метастабільних станів переходять у глибший — основний — стан $3s^2\ ^1S_0$. Схематично ці процеси запишемо у вигляді:

$$\mathrm{Mg}(3s3p\ ^3P_0) + e \to \mathrm{Mg}(3s^2\ ^1S_0) + e', \tag{5}$$

$$\mathrm{Mg}(3s3p\ ^3P_2) + e \to \mathrm{Mg}(3s^2\ ^1S_0) + e'', \tag{6}$$

де e — налітаючий електрон з енерґією eV_p, e' та e'' — відповідно надпружно розсіяні електрони з енерґіями $(eV_p + 2.71)$ еВ та $(eV_p + 2.72)$ еВ. Ураховуючи, що енерґії розсіяних електронів відрізняються лише на 0.01 еВ, слід сказати, що наведений на рис. 2 результат відображає усереднений переріз процесів (5) та (6).

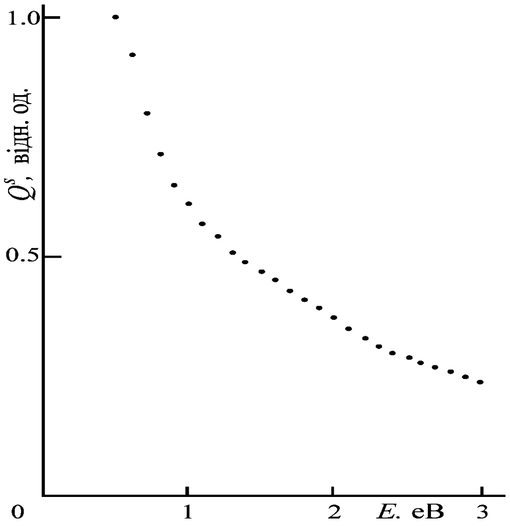

Рис. 2. Енерґетична залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів на метастабільних $3s3p\ ^3P_{0,2}$ станах атома магнію.

Зауважимо, що рівняння (5) та (6) відображають процеси розсіяння, заборонені за спіном. Це означає, що перебіг процесів (5) та (6) здійснюється в результаті обмінної взаємодії між налітаючим та атомним електронами.

[1] T. Y. Jiang, M. Zuo, L. Vušković, B. Bederson, Phys. Rev. Lett. **68**, 915 (1992).

[2] T. Y. Jiang, Z. Shi, C. H. Ying, L. Vušković, B. Bederson, Phys. Rev. A **51**, 3773 (1995).

[3] Н. В. Беденков, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев, В. А. Романенко, Журн. техн. физ. **58**, 469 (1988).

[4] А. Б. Благоев, Ю. М. Каган, Н. Б. Колоколов, Р. И. Лягущенко, Журн. техн. физ. **44** 339 (1974).

[5] A. Blagoev, S. Kovachev, G. Petrov, Ts. Popov, J. Phys. B **25**, 1599 (1992).

[6] О. Б. Шпеник, В. В. Совтер, А. Н. Завилопуло, И. П. Запесочный, Е. Э. Контрош, Журн. эксп. теор. физ. **69**, 48 (1975).

[7] А. Стаматович, Дж. Шульп, Приборы науч. исслед. № 3 , 115 (1970).

[8] Н. И. Романюк, О. Б. Шпеник, И. П. Запесочный, Письма журн. эксп. теор. физ. **32**, 472 (1980).

[9] О. Б. Шпеник, Н. М. Эрдевди, Н. И. Романюк, Т. Ю. Попик, А. Н. Завилопуло, Приборы техн. эксп. № 1, 109 (1998).

[10] В. І. Марушка, С. Ю. Угрин, І. І. Шафраньош, Наук. вісн. Ужгородського ун-ту, сер. фіз. № 3, 33 (1998).

[11] I. I. Shafranyosh, M. O. Margitich, Z. Phys. D **37**, 97 (1996).

SUPERELASTIC ELECTRON SCATTERING FROM THE METASTABLE MAGNESIUM ATOMS

I. I. Shafranyosh, V. I. Marushka

Uzhhorog National University, Chair of Quantum Electronics,
54 Voloshyn Str., Uzhhorod, UA–88000, Ukraine

The experimental studies of superelastic electron scattering from the metastable magnesium atoms have been performed. The investigations were carried out in the crossed electron and atomic beams by using the electron spectrometer. The energy dependence and the absolute value of the superelastic electron scattering cross sections have been measured for the first time.