

УДК 539. 186

П.П. Маркуш

Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017  
e-mail: 1988.markus@gmail.com

## ІОНІЗАЦІЯ ПАРІВ СЕЛЕНУ ПОВІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

В даній роботі досліджено процеси утворення позитивних іонів селену у газовій фазі повільними моноенергетичними електронами. Виміряно енергетичну залежність повного перерізу іонізації селену в діапазоні енергій від порогу до 16 еВ. На енергетичній залежності повного перерізу іонізації селену у припороговій області ідентифіковано потенціали іонізації молекул  $Se_8$ ,  $Se_6$ ,  $Se_2$ ,  $Se_4$ ,  $Se_3$  та атома  $Se$ . Встановлено, що іони фрагментів  $Se^+$ ,  $Se_2^+$ ,  $Se_3^+$  дають внески в повний переріз іонізації селену у газовій фазі та визначено їх енергій появи.

**Ключові слова:** повільні електрони, кластери, іонізація, гіпоциклоїдальний електронний спектрометр, енергія появи іонів.

### Вступ

Селен – напівпровідник, який має відмінні фотоелектричні і фотопровідні властивості. Завдяки цьому він широко використовується у фотоелементах, сонячних батареях та різних напівпровідникових пристроях.

Характерною особливістю його є чутливість до зміни температури у газовій фазі. Відомо з експериментів [1, 2], що процес випаровування селену супроводжується утворенням різних його модифікацій  $Se_n$  ( $n=2-8$ ). Молекули селену з кількістю атомів більше трьох можна віднести до кластерних систем, які в багатьох аспектах являють собою стан матерії, що знаходиться за властивостями між атомами і молекулами з одного боку і твердими тілами з іншого.

Важливу інформацію про властивості нейтральних кластерів можна отримати вивчаючи їх іонізацію при зіткненні з електронами низьких енергій. У зв'язку з цим, метою даної роботи є дослідження процесів іонізації та фрагментації молекул селену повільними моноенергетичними електронами.

### Експериментальна частина

Для вивчення процесів утворення позитивних іонів селену у газовій фазі нами було використано гіпоциклоїдальний

електронний спектрометр (ГЕС) з паронаповненою коміркою (див. рис. 1). Детальний опис конструкції ГЕС та принцип його роботи наведено у роботі [3].

Отримання селену у газовій фазі здійснювалося за допомогою ефузійного джерела з резистивним нагрівом при температурі 180°C. Щоб отримати достатньо великий корисний сигнал на детектор іонів, струм електронів через паронаповнену комірку встановлювався рівним 120 нА. При цьому моноенергетичність електронного пучка складала  $\Delta E_{1/2}=0,2$  еВ (повна ширина на половині висоти розподілу електронів), а контактна різниця потенціалів між катодом і коміркою була рівною 1,4 еВ. Ці параметри визначалися диференціюванням початкової ділянки вольт-амперної характеристики електронного пучка на колектор F1. Енергія електронів задавалась різницею потенціалів між катодом та паронаповненою коміркою (камера зіткнень) з кроком сканування 50 меВ та експозицією у точках виміру 1 с. На детектор іонів подавався витягуючий потенціал  $-1.5$  В, що було достатнім для повного збору іонів із камери зіткнень. Протягом вимірів у робочій камері підтримувався вакуум не гірше  $2 \times 10^{-6}$  Торр. ГЕС поміщено в однорідне магнітне поле, що створюється парою кілець Гельмгольца діаметром 230 мм. Реєстрацію сигналів та керування процесом вимірів автоматизовано за

допомогою програми, розробленої нами для персонального комп'ютера, що дає можливість візуалізації вимірних залежностей в ході експерименту.

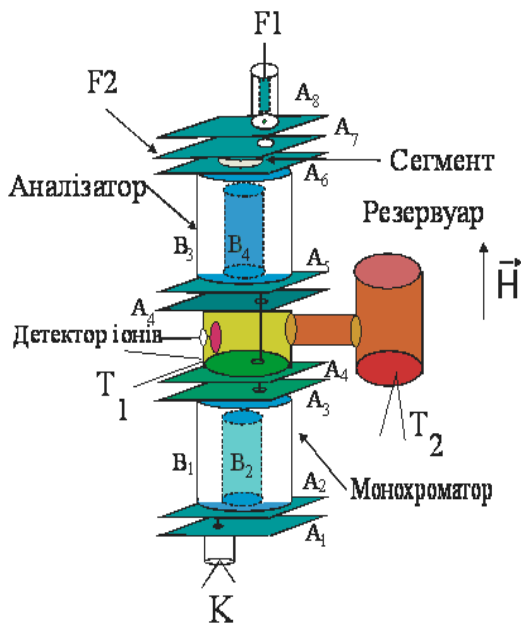


Рис. 1. Гіпоциклоїдальний електронний спектрометр з паронаповненою коміркою:  
 $A_1$ - $A_7$  – електроди формування електронного пучка,  
 $B_1$ - $B_4$  – електроди циліндричних конденсаторів,  
 $T_1$  і  $T_2$  – термопари,  
 $F_1$ ,  $F_2$  та  $A_8$  – колектори електронів первинного пучка та розсіяних електронів.

### Результати та обговорення

На рис. 2 представлена вимірjana нами енергетична залежність повного перерізу іонізації селену повільними електронами в діапазоні енергій від порогу до 16 еВ. Проведений нами аналіз вимірjаної кривої показав, що на ній спостерігаються зміни нахилу у вигляді зломів. За допомогою спеціальної процедури апроксимації лінійних ділянок вимірjаної кривої нами були виділені ці зломи, точки перетину яких дають енергії появи нових каналів іонізації. Таким способом нами визначені поріг функції іонізації селену, що становить 8,05 еВ, та енергетичні положення виявлених зломів на вимірjаній кривій. Для ілюстрації на рис. 3 представлені лінійні ділянки енергетичної залежності повного перерізу іонізації селену у припороговій області.

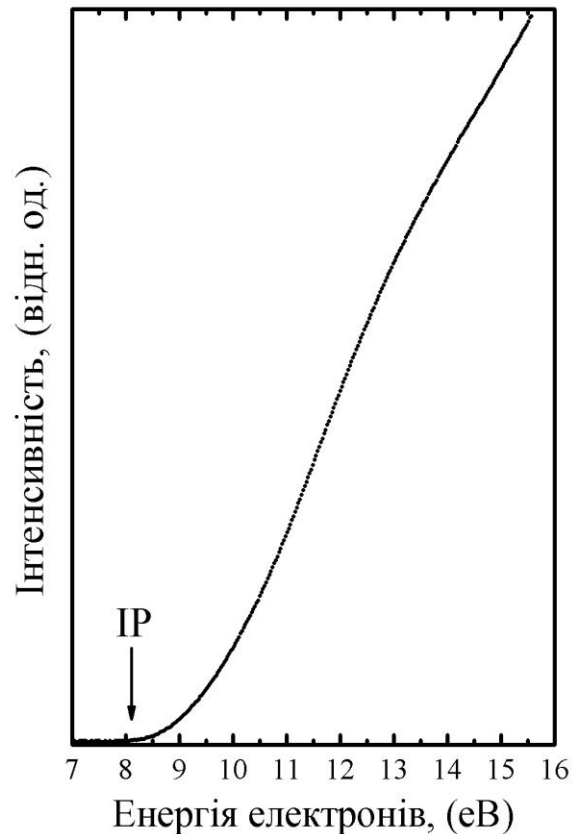
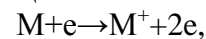


Рис. 2. Енергетична залежність повного перерізу іонізації селену в діапазоні енергій від порогу до 16 еВ.

Виникнення цих особливостей на функції іонізації в першу чергу зумовлено наступними процесами іонізації, внаслідок яких утворюються позитивні іони [4]:

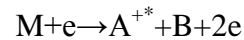
1. Пряма іонізація:



2. Дисоціативна іонізація:



3. Фрагментація збудженого молекулярного іона:



У таблиці 1 наведені потенціали іонізації молекул селену (IP), які визначені у роботах [5, 6] та енергетичні положення виявлених нами зломів у припороговій області. Як бачимо з таблиці 1, результати даної роботи задовільно узгоджуються з результатами роботи [5], у якій потенціали іонізації молекул селену визначалися методом фотоіонізації. Однак, спостерігається відмінність від результатів роботи [6], автори якої вивчали утворення позитивних іонів молекул селену електронним ударом.

Ця відмінність пояснюється великим кроком сканування енергії електронів, що у роботі [6] становив 0,3 еВ. За результатами роботи [5] енергетичні положення порогу

8,05 еВ та зломів, які виявлені нами при енергіях 8,32 еВ, 8,87 еВ, 9,10 еВ, 9,39 еВ, 9,75 еВ, відповідають потенціалам іонізації молекул Se<sub>8</sub>, Se<sub>6</sub>, Se<sub>2</sub>, Se<sub>4</sub>, Se<sub>3</sub> та атома Se, відповідно.

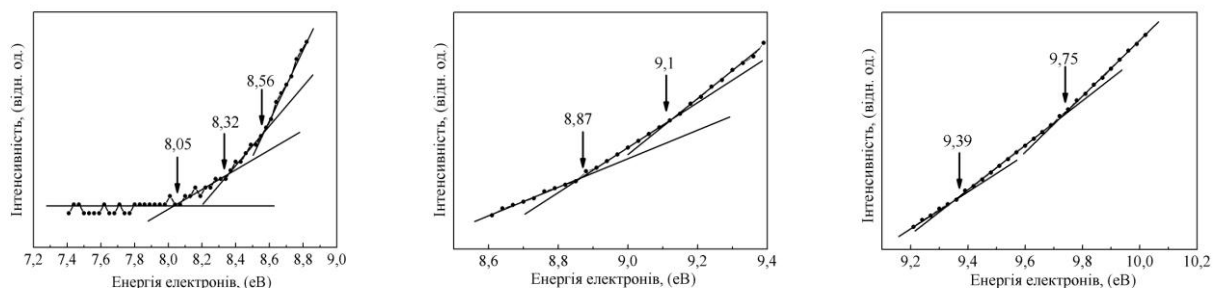
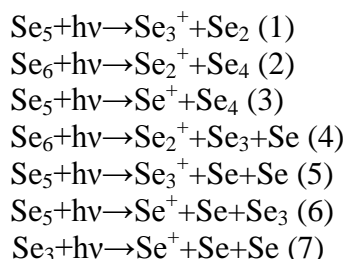


Рис. 3. Ділянки енергетичної залежності повного перерізу іонізації селену у припороговій області.

У роботі [5] проводилися теоретичні розрахунки з метою визначення енергій появи фрагментних іонів при фотодисоціації молекул селену та представлені відповідні реакції цих процесів. У подальшому будуть показані реакції фотодисоціації молекул селену (1-7) [5], внаслідок яких утворюються іони-фрагменти.



Енергії їх появи співпадають з енергетичними положеннями виявлених нами зломів на вимірній кривій. У таблиці 2 наведені енергії появи (АЕ) фрагментних іонів молекул селену та результати даної роботи. Як бачимо з таблиці 2 енергетичні положення зломів при енергіях 10,50 еВ, 10,94 еВ, 12,24 еВ, 12,95 еВ, 13,55 еВ, 14,28 еВ та 14,74 еВ задовільно узгоджуються з енергіями появи фрагментних іонів Se<sup>+</sup>, Se<sub>2</sub><sup>+</sup> і Se<sub>3</sub><sup>+</sup>. Також слід відмітити, що ці іони переважно утворюються в результаті фотодисоціації молекул Se<sub>3</sub>, Se<sub>5</sub> і Se<sub>6</sub>. Звідси випливає, що у нашому експерименті найбільш імовірно відбуваються аналогічні процеси фотодисоціації за участю електронів.

Таблиця 1

**Потенціали іонізації (ІР) молекул селену**

Молекули селену Se <sub>n</sub>	ІР, еВ електронами [5]	ІР, еВ фотонами [6]	Наші результати, еВ
1	9,75±0,05	-	9,75±0,05
2	8,84±0,05	8,3±0,3	8,87±0,05
3	9,58±0,05	9,2±0,3	9,39±0,05
4	9,14±0,05	9,1±0,3	9,10±0,05
5	7,93±0,05	8,3±0,3	-
6	8,24±0,05	8,4±0,3	8,32±0,05
7	7,94±0,05	8,2±0,3	-
8	8,11±0,05	8,4±0,3	8,05±0,05

**Енергії появи (АЕ) фрагментних іонів молекул селену**

Реакції фотодисоціації №	Утворені іони фрагментів	АЕ, еВ [5]	Наші результати
1	Se <sub>3</sub> <sup>+</sup>	10,54	10,50
2	Se <sub>2</sub> <sup>+</sup>	10,79	10,94
3	Se <sup>+</sup>	12,18	12,24
4	Se <sub>2</sub> <sup>+</sup>	12,90	12,95
5	Se <sub>3</sub> <sup>+</sup>	13,55	13,55
6	Se <sup>+</sup>	14,28	14,28
7	Se <sup>+</sup>	14,73	14,74

**Висновки**

Нами вперше ретельно виміряно повний переріз іонізації селену повільними електронами від порогу іонізації до 16 еВ з кроком сканування енергії електронів 50 меВ та моноенергетичністю електронного пучка 0,2 еВ.

На енергетичній залежності повного перерізу іонізації селену ідентифіковано потенціали іонізації молекул Se<sub>8</sub>, Se<sub>6</sub>, Se<sub>2</sub>, Se<sub>4</sub>, Se<sub>3</sub> та атома Se, що відображають склад парів селену при температурі 180 °С.

Встановлено, що процес дисоціативної іонізації молекул селену при зіткненнях з повільними електронами має важливе значення в досліджуваному нами діапазоні енергій електронів.

Автор щиро вдячний академіку НАН України О.Б. Шпенику, старшому науковому співробітнику Є.Е. Контрошу та науковому співробітнику І.В. Чернишовій за постійний інтерес до роботи, всебічну підтримку та корисні зауваження.

*Робота виконувалась за фінансової підтримки міжнародного гранту №F183139 "Collegium Talentum".*

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Berkowitz J. and Chupka W.A. Comment on the Composition of Selenium Vapor // J. Chem. Phys. – 1968. – V.48. – P. 5743-5744.
2. Berkowitz J. and Chupka W.A. Equilibrium Composition of Selenium Vapor; the Thermodynamics of the Vaporization of HgSe, CdSe, and SrSe // J. Chem. Phys. – 1966. – V.45. – P. 4289-4302.
3. Контрош Е.Э., Чернышова И.В., Шпеник О.Б. Припороговая ионизация магния электронным ударом // Опт. спектр. – 2006. – Т.101. – С. 570-578.
4. Rosinger W., Grade M., Hirschwald W. Detection of ion states of S<sub>2</sub> to S<sub>8</sub> by electron impact // Int. Journal of Mass Spectroscopy and Ion Physics. – 1983. – V.47. – P. 239-242.
5. Kooser K., Ha D.T., Itälä E., Laksman J. Size selective spectroscopy of Se microclusters // J. Chem. Phys. – 2012. – V.137. – P. 044304.1-9.
6. Tribollet B., Benamar A., Rayane D., Melinon P. and Broyer M. Experimental studies on selenium cluster structures // Z. Phys.D – 1993 – D.26. – P. 352-354.

Стаття надійшла до редакції 03.04.2013

P.P. Markush

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine  
Universitetska Str., 21, Uzhhorod, 88017

## POSITIVE IONIZATION OF SELENIUM VAPOR BY LOW ENERGY ELECTRON IMPACT

In this work, the formation of positive ions in selenium vapor by low energy electron impact has been studied. The energy dependence of the ionization cross section of selenium vapor was measured in the energy region from the threshold up to 16 eV. In the near threshold energy region, the ionization potentials of the  $Se_8$ ,  $Se_6$ ,  $Se_2$ ,  $Se_4$ ,  $Se_3$  molecules and Se atom were identified. It has been found out that fragment ions gave yield to ionization cross section of selenium vapor as well as appearance energies of these ions were determined.

**Keywords:** low energy electrons, clusters, ionization, hypocycloidal electron spectrometer, ion appearance energies.

П.П. Маркуш

Институт электронной физики НАН Украины  
ул. Университетская, 21, Ужгород, 88017

## ИОНИЗАЦИЯ ПАРОВ СЕЛЕНА МЕДЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

В настоящей статье исследованы процессы образования положительных ионов селена в газовой фазе при взаимодействии с медленными моноэнергетическими электронами. Измерена энергетическая зависимость полного сечения ионизации селена в диапазоне энергий от порога до 16 эВ. На энергетической зависимости полного сечения ионизации селена идентифицированы потенциалы ионизации молекул  $Se_8$ ,  $Se_6$ ,  $Se_2$ ,  $Se_4$ ,  $Se_3$  и атома Se. Установлено, что ионы фрагментов молекул селена дают вклады в полное сечение ионизации селена в газовой фазе и определены их энергии появления.

**Ключевые слова:** медленные электроны, кластеры, гипоциклоидальный электронный спектрометр, ионизация, энергия появления ионов.