

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.044>

УДК 539.188;537.186

О.Б. Шпеник, А.М. Завілопуло, О.В. Пилипчинець

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород

E-mail: gzavil@gmail.com

Іонізація телуру в газовій фазі електронами

Представлено академіком НАН України О.Б. Шпеником

Методом мас-спектрометрії з використанням методики пучків, що перетинаються, досліджено процеси іонізації телуру в газовій фазі електронним ударом. Вивчено мас-спектр телуру в діапазоні масових чисел 50–350 Да при різних енергіях іонізуючих електронів від 6 до 70 eV та в інтервалі температур 400–600 К. Мас-спектр складається з трьох груп піків, які відповідають атомарним Te^+ , молекулярним Te_2^+ та двозарядним Te^{2+} іонам телуру. Показано, що співвідношення інтенсивності ізотопних піків до основного зберігається як для атомарних, так і для молекулярних іонів. Знайдено, що в газовій фазі при температурах експерименту переважають двоатомні молекули телуру. Досліджено функції іонізації іонів Te^+ , Te_2^+ та Te^{2+} методом найменших квадратів та за пороговими ділянками кривих визначено значення енергій появи і іонізації молекулярних та атомарних іонів телуру. Вперше в мас-спектрі телуру знайдено двозарядний іон Te^{2+} , для якого отримана енергетична залежність іонізації електронним ударом і визначена енергія іонізації, що дорівнює $E = 20,6 \pm 0,25$ eV.

Ключові слова: іонізація, електронний удар, телур, енергія появи.

Елементарні процеси за участю халькогенів VI групи періодичної системи вивчаються починаючи з 60-х років минулого сторіччя, що свідчить про актуальність та практичну цінність таких досліджень. Завдяки унікальним властивостям телуру, він широко застосовується в різних галузях науки і техніки. Зокрема, маючи відмінні фотоелектричні і фотопровідні властивості, телур успішно використовується в різних напівпровідникових пристроях. Можна відзначити, що неперервне лазерне випромінювання вперше спостерігалось на ізотопах Te_2 в спектральному діапазоні 460–780 нм з пороговими потужностями в декілька мВт при ефективності в 5 % [1]. Тому не дивно, що дослідженням різних властивостей телуру присвячена значна кількість робіт, в більшості з яких розглянуті його термодинамічні властивості. Методом лазерної мас-спектроскопії та термодинамічного аналізу визначена структура, склад й зроблено порівняння кластерів Se_n і Te_n [2, 3]. Показано, що їх мас-спектри мають значні відмінності та різні властивості: для селену спостерігається періодичність, а для телуру така періодичність відсутня. Тому циклічна структура молекул

© О.Б. Шпеник, А.М. Завілопуло, О.В. Пилипчинець, 2018

селену не дозволяє утворювати великі кластери Se_n ($n_{\max} = 8$), а для телуру вони легко утворюються Te_n ($n_{\max} = 56$). Подібні мас-спектрометричні та термодинамічні дослідження проведені для телурмістких компонент [4–6]. Методом мас-спектрометрії вторинних іонів досліджено розподіл інтенсивності Te_n^+ та Te_n^- кластерних іонів телуру в діапазоні $n = 2\div 56$ атомів, знайдено, що існує різниця для позитивних та від'ємних іонів зміна інтенсивності при певних n , що пояснюється нефункціональними каналами фрагментації. Методом функціонала густини проведено теоретичні розрахунки мас-спектрів та структури телуру, показано, що замкнута кільцева структура телуру найбільш стабільна, її зміни залежать від кута зв'язку між атомами та їх координатного числа в кластері Te_n .

Значно менше робіт з дослідження іонізації телуру та телурмістких компонент електронним ударом. Однією з найцікавіших особливостей цієї групи халькогенів є широкий спектр алотропних форм. Залежно від температури випаровування у газовій фазі в різних співвідношеннях можуть знаходитися атоми, двоатомні та багатоатомні молекули [6]. Зазначимо, що мас-спектрометрія являється найбільш зручним методом вивчення елементного складу в газовій фазі. Таким чином, з точки зору фундаментальних знань, не викликає сумнівів актуальність і важливість вивчення елементарних процесів взаємодії повільних електронів з елементами, які знаходяться в газовій фазі.

Метою даної роботи є мас-спектрометричне дослідження процесів іонізації телуру в газовій фазі електронним ударом в області енергій від порогу процесу до 70 еВ.

Експериментальні дослідження зі взаємодії електронів з телуrom проведені на установці з монопольним мас-спектрометром MX 7304A [7], який має розділення по масі $\Delta M = 1$ Да. Молекулярний пучок формувался за допомогою ефузійного джерела, це дозволяло формувати пучок молекул телуру з концентрацією в області взаємодії з електронами близько $10^{10}\text{--}10^{11}$ см⁻³. Джерело іонів з електронною іонізацією працювало в режимі стабілізації струму і дозволяло отримувати пучки електронів з фіксованою енергією від 5 до 90 еВ при струмах в 0,05–0,5 мА і розкидом електронів по енергії $\Delta E = 250$ меВ.

Оскільки телур має ізопопи в діапазоні масових чисел 120–130 Да, то з метою їх точного визначення особливу увагу при дослідженні мас-спектрів було приділено калібруванню шкали мас. В якості тестових елементів використовувались атоми Kr і Xe, ізопопи яких знаходяться в інтервалі мас 78–134 Да. Для цього в область взаємодії здійснювався напуск газів криптону та ксенону і по іонах стабільних ізопопів [8]: $^{78}Kr^+$, $^{80}Kr^+$, $^{82}Kr^+$, $^{83}Kr^+$, $^{84}Kr^+$, $^{86}Kr^+$ и $^{64}Xe^+$, $^{65}Xe^+$, $^{66}Xe^+$, $^{67}Xe^+$, $^{68}Xe^+$, $^{124}Xe^+$, $^{126}Xe^+$, $^{128}Xe^+$, $^{129}Xe^+$, $^{130}Xe^+$, $^{131}Xe^+$, $^{132}Xe^+$, $^{134}Xe^+$ проводилася калібровка шкали мас-спектрометра і визначалась належність відповідних піків ізопопам телуру. Шкала енергій електронів калібрувалась по початковій ділянці функції іонізації молекули N₂, поріг якої відомий з великою точністю.

Експеримент проводили у два етапи: на першому етапі вимірювали мас-спектри телуру в діапазоні масових чисел 50–350 Да при різних енергіях іонізуючих електронів від 6 до 70 еВ та в інтервалі температур випаровування 400–600 К, а на другому етапі вивчались енергетичні залежності перерізів іонізації іонів Te^+ , Te^{2+} та Te_2^+ , при цьому особлива увага приділялась вивченню порогових залежностей функцій іонізації, за якими визначалися енергії появи відповідних іонів.

Телур на відміну від сірки та селену менш хімічно активний, він має різко виражені металеві властивості, кристалічна решітка гексагональна, структура складається з паралельно

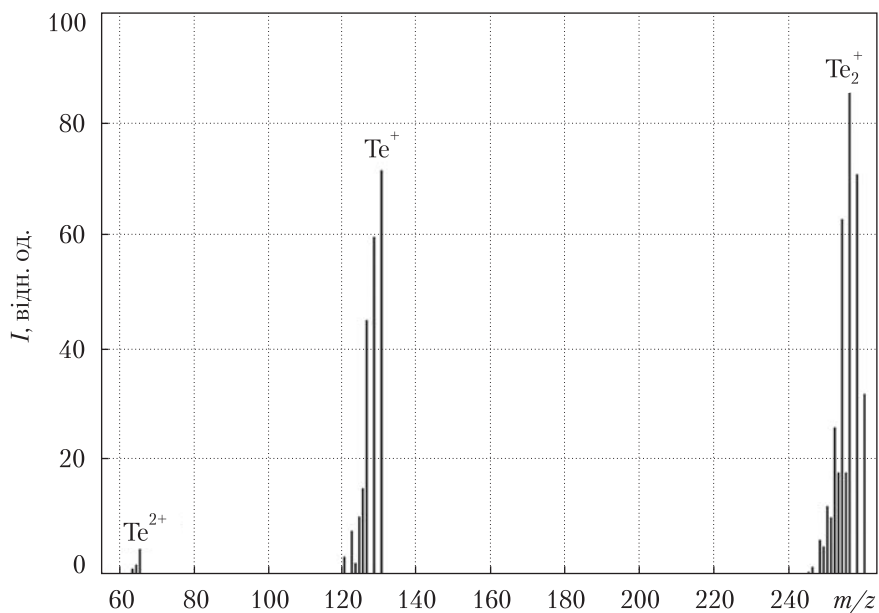


Рис. 1. Мас-спектр телуру, енергія електронів $E = 70$ eV, температура $T = 600$ К

розташованих спіральних ланцюгів, температура плавлення 722 К, кипіння 1262 К. Зовнішня електронна оболонка атома телуру має конфігурацію $5s^25p^4$ і при зіткненнях з електронами утворення іонів, найбільш ймовірно, відбувається за рахунок втрати s або p-електрона. Внаслідок хімічної взаємодії атом телуру віддає валентні електрони і стає позитивним іоном, або приймаючи електрон від іншого атома перетворюється у від’ємний іон. У природі зустрічаються вісім ізотопів телуру, п’ять з них: ^{120}Te , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{125}Te і ^{126}Te — стабільні, а інші ізотопи (^{123}Te , ^{128}Te і ^{130}Te) — радіоактивні. Стабільні ізотопи складають лише 33,3 % загальної кількості телуру, які зустрічаються в природі, що пов’язано з надзвичайно довгим періодом піврозпаду природних радіоактивних ізотопів, час життя яких складає від $6 \cdot 10^{14}$ до $2,2 \cdot 10^{24}$ років, а ізотоп ^{128}Te має найдовший період піврозпаду з усіх відомих радіонуклідів [5]. Сполуки телуру проявляють різні хімічні властивості у порівнянні із сіркою і селеном, що пояснюється особливістю його структури та слабкою електровід’ємністю. З іншого боку телур може замінити сірку або селен у сполуках, тобто телур може бути заміщений неспецифічними метаболічними шляхами і виникати в біомолекулах під час детоксикації

Таблиця 1. Порівняння відносної інтенсивності молекулярних та атомарних іонів телуру при $T = 600$ К

Відносні інтенсивності піків, %							
Позитивні іони	Наші дані	[3]	[4]	Від’ємні іони	[5]	[3]	[2]
$^{130}\text{Te}^+$	77	40	88	$^{130}\text{Te}^-$	78	51	77
$^{260}\text{Te}_2^+$	100	100	100	$^{260}\text{Te}_2^-$	100	100	100
$\text{Te}_2^+/\text{Te}^+$	1,29	2,5	1,13	$\text{Te}_2^-/\text{Te}^-$	1,20	1,96	1,42

[6]. Все це додає актуальності експериментам з телуrom та телурмісткими сполуками.

Варто відзначити, що в нашій лабораторії були проведені дослідження процесів збудження та іонізації сірки, селену, телуру при зіткненнях з електронами низьких енергій (1–30 eV), в яких вивчені оптичні функції збудження молекулярних смуг, атом-

них і іонних спектральних ліній цих елементів, та з високою точністю визначені енергетичні положення порогів збудження і встановлені механізми утворення атомних і іонних спектральних переходів [9].

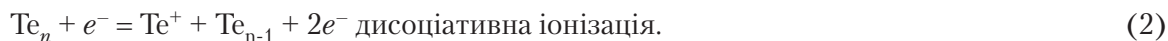
Мас-спектр телуру характеризується головним чином відносною інтенсивністю природних ізотопів телуру, причому інтенсивність піків у спектрі є сумою ймовірностей всіх комбінацій різних ізотопів, що мають однакове значення m/z [8].

На рис. 1 представлено отриманий нами мас-спектр телуру, однією з особливостей якого є наявність вперше нами знайденого двозарядного іона телуру. Слід зауважити, що технічні параметри мас-спектрометра MX7304A обмежують діапазон досліджуваних мас до 500 Да, тому було доцільно обмежити температуру випаровування, при якій молекули Te_n з $n > 2$ практично відсутні [3, 4].

Аналізуючи отриманий мас-спектр, можна відзначити, що в дослідженому інтервалі мас чітко виділяються три групи (серії) піків, які відповідають двозарядному (Te^{2+}), атомарному (Te^+) та молекулярному (Te_2^+) іонам. У кожній групі чітко розділяються піки, що відповідають ізотопам телуру, а максимальні за інтенсивністю належать: $^{65}Te^{2+}$, $^{128}Te^+$, $^{130}Te^+$, $^{256}Te_2^+$, $^{260}Te_2^+$. Зауважимо, що співвідношення інтенсивності ізотопних піків до основного зберігається як для атомарних, так і для молекулярних іонів. Виникнення монокатіонів телуру під дією електронного удару може відбуватися за наступними схемами:



або внаслідок іонізації молекули Te_n :



Двозарядний іон Te^{2+} утворюються так:



або



Інтенсивність піку в групах Te^{2+} , Te^+ та Te_2^+ , відповідно до схем (1)–(4), повинна бути різною (див. рис. 1) і може залежати як від ефективного перерізу процесу [10], так і від температури випаровування зразка. Найбільший пік у мас-спектрі належить молекулярному катіону Te_2^+ , оскільки стан молекули Te_2 є найбільш стабільним для телуру в газовій фазі у широкому діапазоні температур випаровування і саме в цьому стані в складі парів спостерігається максимальна кількість двоатомних молекул телуру [6]. Зауважимо, що у процесі фотодисоціативної іонізації кластерів телуру у мас-спектрі (табл. 1) спостерігається подібна ситуація [5]. Відзначимо також, що у мас-спектрі від'ємних іонів інтенсивність молекулярних іонів Te_2^- вища за інтенсивність атомарних Te^- [3, 6]. В роботах [11, 12] нами показано, що така поведінка властива також катіонам халькогенів сірки та селену, у мас-спектрах яких максимальні піки також належать молекулярним іонам S_2^+ і Se_2^+ .

В табл. 1 надано порівняння відносної інтенсивності молекулярних та атомарних іонів телуру в мас-спектрах, які отримані методами електронної і фотонної іонізації. Аналіз наведених у таблиці даних свідчить про те, що поява в мас-спектрі іонів Te^+ відбувається за

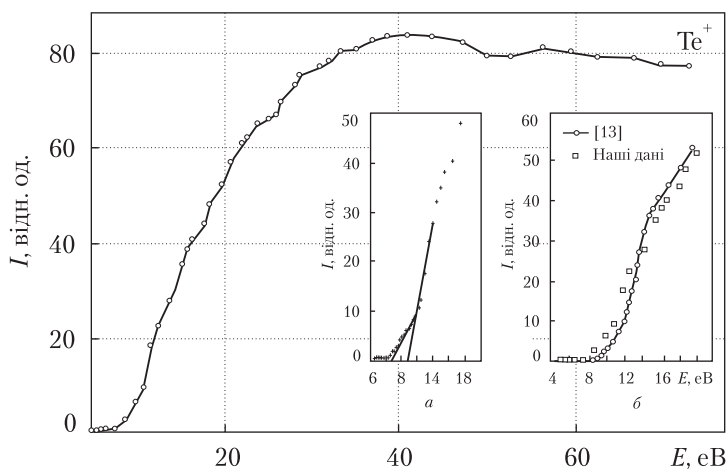


Рис. 2. Енергетична залежність утворення іонів телуру. На вставці: *a* – порогова ділянка; *б* – порівняння порогових ділянок

рахунок процесів (1) і (2), причому процес дисоціативної іонізації має перевагу перед прямою іонізацією

Як згадано вище, нами проведені виміри мас-спектрів у різних температурних режимах, в яких отримано температурні залежності утворення іонів телуру в діапазоні

зоні 450–610 К при енергії іонізуючих електронів $E_e = 70$ еВ. Виявилось, що відносні інтенсивності іонних піків, що належать телуру, в досліджуваному інтервалі температур мають практично лінійний характер на відміну від аналогічних залежностей у випадку сірки і селену [11, 12], для яких спостерігається відхилення від лінійності температурних коефіцієнтів для всіх досліджуваних іонів.

Налаштувавши мас-спектрометр на виділення певної маси, нами були виміряні відносні енергетичні залежності перерізів формування найбільш інтенсивних іонів Te^+ , Te_2^+ та Te^{2+} (див. рис. 1), що виникають в процесі іонізації телуру від порогу процесу до 70 еВ. На рис. 2 та 3 представлені криві іонізації відповідних іонів телуру. Як видно із наведених результатів, характерним для всіх кривих є те, що від порогу процесу ефективні перерізи іонізації різко наростають до 20–30 еВ, а в області більш високих енергій величина перерізу практично не змінюється, що властиво для ефективних перерізів іонізації атомів електронним ударом в газовій фазі [10]. Енергетична залежність утворення атомарних іонів телуру (рис. 2) має в діапазоні енергій 9–18 еВ різкий ріст перерізу і декілька особливостей біля порогу, далі – полого ділянку аж до $E = 70$ еВ. На вставці *б* наведено порівняння наших результатів з даними роботи [13], і, як видно, спостерігається непоганий збіг між кривими. Однак, якщо на пороговій ділянці кривої (див. вставку *a* на рис. 2) провести лінійні екстраполяції, то можна отримати дві точки перетину кривої з віссю енергій: 8,8 та 10,9 еВ.

Таблиця 2. Порівняння енергій появи і іонізації молекулярних та атомарних іонів телуру

Іон	Енергія появи (E_{AP}), еВ					Енергія іонізації (E_{IP}), еВ				
	Наші дані	[2]	[6]	[8]	[13]	Наші дані	[14]	[8]	[10]	[15]
Te^+	$10,9 \pm 0,25$	—	12,20	$10,8 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,2$	$8,8 \pm 0,25$	$9,5 \pm 1,0$	8,9	8,96	9,009
Te_2^+		8,26	9,00	—	$9,0 \pm 0,2$	$8,3 \pm 0,25$	$8,4 \pm 0,6$	$8,3 \pm 0,2$	—	—
Te^{2+}		—	—	—	—	$20,6 \pm 0,25$	—	—	27,3	18,6

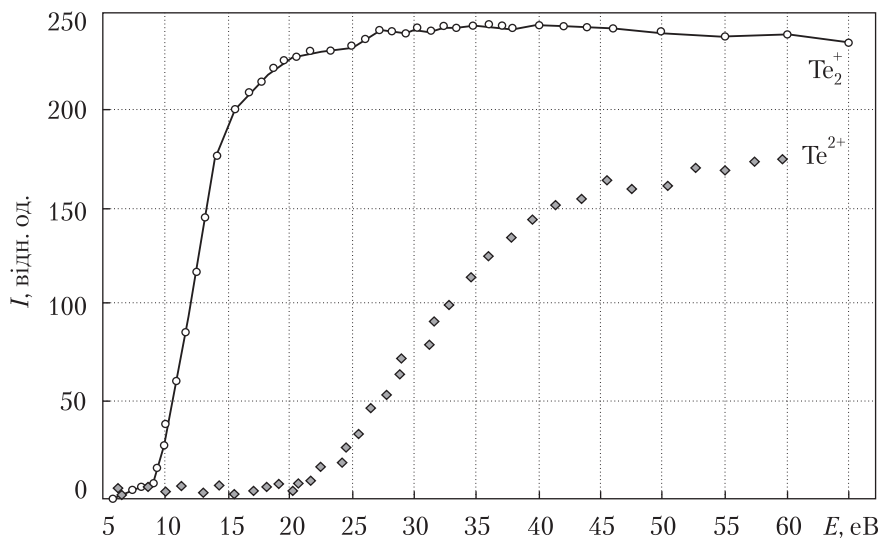


Рис. 3. Енергетичні залежності утворення молекулярних (Te_2^+) та двозарядних (Te^{2+}) іонів телуру

Різниця між ними складає 2,1 eV, що відповідає енергії дисоціації молекули Te_2 . Тому можна вважати, що в газовій фазі при наших температурах більшу частину в пучку складають молекули Te_2 , тоді сам процес іонізації має відбуватися переважно за схемою:



На рис. 3 наведено енергетичні залежності утворення молекулярних (Te_2^+) та двозарядних (Te^{2+}) іонів телуру. Двозарядні іони телуру утворюються відповідно до рівняння (3), а молекулярні — за схемою:



Відповідно до рівнянь (3), (6) початок кривих енергетичних залежностей суттєво різниться по шкалі енергій. Також відрізняється загальний хід кривих в дослідженій області енергій: функція іонізації Te_2^+ від порогу до 14 eV швидко зростає, далі переріз практично не змінюється з енергією аж до 70 eV. Що стосується функції іонізації Te^{2+} , то вона навпаки — дуже повільно зростає від порогу до 50 eV. Абсолютна величина ефективного перерізу за даними [10] при енергії електронів $E = 70$ eV відноситься як $Te_2^+/Te^{2+} = 10$, такого ж порядку і відношення інтенсивності відповідних піків іонів Te_2^+ до Te^{2+} у мас-спектрі (див. рис. 1).

У табл. 2 представлені одержані нами енергії появи іонів телуру: Te^+ , Te_2^+ та Te^{2+} , які визначені методом найменших квадратів [12] за пороговими ділянками їх відносного перерізу іонізації (див. рис. 2 та 3), а для порівняння наведені також дані з інших робіт. Слід підкреслити, що представлені дані по енергіях появи та потенціалу іонізації, крім роботи [6], відносяться до 60-х років минулого сторіччя.

Аналізуючи результати табл. 2, бачимо, що найбільш повна інформація по іонах телуру надана в нашій роботі, крім того, значення енергій появи і іонізації молекулярних та атомарних іонів телуру розрізняються, особливо для Te^{2+} .

Таким чином, методом мас-спектроскопії з використанням методики пучків, що перетинаються, досліджено процеси іонізації телуру в газовій фазі електронним ударом. Вивчено мас-спектр телуру в діапазоні 50–350 Да при різних енергіях іонізуючих електронів від 6 до 70 еВ та в інтервалі температур 400–600 К. Мас-спектр складається з трьох груп піків, які відповідають атомарним Te^+ , молекулярним Te_2^+ та двозарядним Te^{2+} іонам телуру. У кожній групі чітко виділяються піки, що відповідають ізотопам телуру, а максимальні за інтенсивністю серед них належать $^{65}\text{Te}^{2+}$, $^{128}\text{Te}^+$, $^{130}\text{Te}^+$, $^{256}\text{Te}_2^+$, $^{260}\text{Te}_2^+$. Показано, що співвідношення інтенсивності ізотопних піків до основного зберігається як для атомарних, так і для молекулярних іонів. Знайдено, що у газовій фазі при наших температурах експерименту переважають двоатомні молекули телуру. Досліджено функції іонізації іонів Te^+ , Te_2^+ та Te^{2+} , методом найменших квадратів за пороговими ділянками кривих визначено значення енергій появи і іонізації молекулярних та атомарних іонів телуру. Вперше у мас-спектрі телуру знайдено двозарядний іон Te^{2+} , для якого отримана енергетична залежність іонізації електронним ударом і визначена енергія іонізації $E = 20,6 \pm 0,25$ еВ.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Topouzkhanian A., Wellegehausen B., Effantin C., D'incan J. and Verges J. New Continuous Laser Emissions in Te_2 . *Laser Chem.* 1983. **1**. № 5. P. 195–209.
2. Willey K.F., Cheng P.Y., Taylor T.G., Bishop M.B., and Duncan M.A. Photoionization and Mass-Selected Photodissociation of Tellurium Clusters. *J. Phys. Chem.* 1990. **94**. № 4. P. 1545–1549. doi: <https://doi.org/10.1021/j100367a061>
3. Hearley Andrew K., Johnson Brian F.G., McIndoe J. Scott, Tuck Dennis G.. Mass spectrometric identification of singly-charged anionic and cationic sulfur, selenium, tellurium and phosphorus species produced by laser ablation. *Inorganica Chimica Acta.* 2002. **334**. P. 105–112. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(02\)00738-7](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(02)00738-7)
4. Albeck Michael & Shaik Sason. Identification of Tellurium-Containing Compounds by Means of Mass Spectrometry. *J. Organometallic Chem.* 1975. **91**. P. 307–313. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(00\)88997-4](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(00)88997-4).
5. Snodgrass J.T., Coe J.V., McHugh K.M., Freidhoff C.B., and Bowen K.H. Photoelectron Spectroscopy of Selenium- and Tellurium-Containing Negative Ions: Se^0 , Se^- , and Te^- . *J. Phys. Chem.* 1989. **93**. P. 1249–1254. doi: <https://doi.org/10.1021/j100341a016>
6. Viswanathan R., Balasubramanian R., Raj D. Darwin Albert, Baba M. Sai, Narasimhan T.S. Lakshmi. Vaporization studies on elemental tellurium and selenium by Knudsen effusion mass spectrometry. *J. Alloys and Compounds.* 2014. **603** P. 75–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.040>.
7. Kukhta A.V., Kukhta I.N., Zaviopulo A.N., Agafonova A.S., Shpenik O.B. Ionization of 4,4'-bis(phenylethynyl)-anthracene by electron impact. *Eur. J. Mass Spectrom.* 2009. **15**. P. 563–570. doi: <https://doi.org/10.1255/ejms.1018>
8. NIST Standard Reference Database. (<http://www.webbook.nist.gov>)
9. Шпенник О.Б., Ердєвді М.М., Маркуш П.П., Контрош Є.Є., Чернишова І.В. Електронне збудження та іонізація парів сірки, селену, телуру. *Укр. фіз. журн.* 2015. **60**. № 3. С. 217–223. doi: <https://doi.org/10.15407/ujpe60.03.0217>
10. Freund Robert S., Wetzel Robert C., Shul Randy J., and Hayes Todd R.. Cross-section measurements for electron-impact ionization of atoms. *Phys. Rev. A.* 1990. **41**. P. 3575–3590. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.3575>
11. Zaviopulo A.N., Markush P.P., Shpenik O.B., Mykyta M.I. Electron Impact Ionization and Dissociative Ionization of Sulfur in the Gas Phase. *Tech. Phys.* 2014. **59**. № 7. P. 951–958. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784214070299>

12. Zaviropulo A.N., Shpenik O.B., Mylymko A.M. Examination of a Molecular Se Beam by Mass Spectrometry with Electron Ionization. *Tech. Phys.* 2017. **62**. № 3. P. 359–364. doi: <https://doi.org/10.1134/S106378421703029X>
13. McFarlane J. & LeBlanc J.C. Fission-Product Tellurium and Cesium Telluride Chemistry Revisited. Whiteshell Laboratories Pinawa, Manitoba ROE. 19961L0 AECL-11333. COG-95-276-I. P.51
14. Franklin J.L. & Dillard J.G. Ionization potentials, appearance potentials, and heats of formation of gaseous positive ions. 1969.
15. Moore C.E. Ionization Potentials and Ionization Limits Derived from the Analysis of Optical Spectra. 1970.

Надійшло до редакції 18.01.2018

REFERENCES

1. Topouzkhanian, A., Wellegehausen, B., Effantin, C., D'incan, J. & Verges, J. (1983). New Continuous Laser Emissions in Te₂, *Laser Chem.*, 1, No. 5, pp. 195-209.
2. Willey, K. F., Cheng, P. Y., Taylor, T. G., Bishop, M. B. & Duncan, M. A. (1990). Photoionization and Mass-Selected Photodissociation of Tellurium Clusters. *J. Phys. Chem.*, 94, No. 4, pp.1545-1549. doi: <https://doi.org/10.1021/j100367a061>
3. Hearley, Andrew K., Johnson, Brian F.G., McIndoe, J. Scott & Tuck, Dennis G. (2002). Mass spectrometric identification of singly-charged anionic and cationic sulfur, selenium, tellurium and phosphorus species produced by laser ablation. *Inorganica Chimica Acta*, 334, pp. 105-112. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(02\)00738-7](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(02)00738-7)
4. Albeck, Michael & Shaik, Sason. (1975). Identification of Tellurium-Containing Compounds by Means of Mass Spectrometry. *J. of Organometallic Chem.*, 91, pp. 307-313. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(00\)88997-4](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(00)88997-4)
5. Snodgrass, J. T., Coe, J. V., McHugh, K. M., Freidhoff, C. B. & Bowen, K. H. (1989). Photoelectron Spectroscopy of Selenium- and Tellurium-Containing Negative Ions: Se⁰, Se⁻, and Te⁻. *J. Phys. Chem.*, 93, pp. 1249-1254. doi: <https://doi.org/10.1021/j100341a016>
6. Viswanathan, R., Balasubramanian, R., Raj, D. Darwin, Albert, Baba, M. Sai & Narasimhan, T.S. Lakshmi. (2014). Vaporization studies on elemental tellurium and selenium by Knudsen effusion mass spectrometry. *J. Alloys and Compounds*, 603, pp. 75-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.040>
7. Kukhta, A. V., Kukhta, I. N., Zaviropulo, A. N., Agafonova, A. S. & Shpenik, O. B. (2009). Ionization of 4,4'-bis(phenylethynyl)- anthracene by electron impact. *Eur. J. Mass Spectrom.*, 15, pp. 563-570. doi: <https://doi.org/10.1255/ejms.1018>
8. NIST Standard Reference Database. (<http://www.webbook.nist.gov>)
9. Shpenik, O. B., Erdevdy, M. M., Markush, P. P., Kontros, J. E. & Chernyshova, I. V. (2015). Electron Impact Excitation and Ionization of Sulfur, Selenium, and Tellurium Vapors. *Ukr. J. Phys.*, 60, No. 3, pp. 217-223. doi: <https://doi.org/10.15407/ujpe60.03.0217>
10. Freund, Robert S., Wetzel, Robert C., Shul, Randy J. & Hayes, Todd R. (1990). Cross-section measurements for electron-impact ionization of atoms. *Phys. Rev. A.*, 41, pp. 3575-3590. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.3575>
11. Zaviropulo, A. N., Markush, P. P., Shpenik, O. B. & Mykyta, M. I. (2014). Electron Impact Ionization and Dissociative Ionization of Sulfur in the Gas Phase. *Technical Physics.*, 59, No. 7, pp. 951-958. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784214070299>
12. Zaviropulo, A. N., Shpenik, O. B. & Mylymko, A. M. (2017), Examination of a Molecular Se Beam by Mass Spectrometry with Electron Ionization. *Technical Phys.*, 62, No. 3, pp. 359-364. doi: <https://doi.org/10.1134/S106378421703029X>.
13. McFarlane, J. & LeBlanc, J.C. (1996) Fission-Product Tellurium and Cesium Telluride Chemistry Revisited. Whiteshell Laboratories Pinawa, Manitoba ROE 1L0 AECL-11333. COG-95-276-I. P.51.
14. Franklin, J.L. & Dillard, J.G. (1969). Ionization Potentials, Appearance Potentials, and Heats of Formation of Gaseous Positive Ions. 223-224, 228-229.
15. Moore, C. E. (1970). Ionization Potentials and Ionization Limits Derived from the Analysis of Optical Spectra.

Received 18.01.2018

О.Б. Шпенник, А.М. Завилопуло, О.В. Пилипчинец

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

E-mail: gzavil@gmail.com

ИОНИЗАЦИЯ ТЕЛЛУРА В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ ЭЛЕКТРОНАМИ

Методом масс-спектрометрии с использованием методики пересекающихся пучков исследованы процессы ионизации теллура в газовой фазе электронным ударом. Изучен масс-спектр теллура в диапазоне массовых чисел 50–350 Да при различных энергиях ионизирующих электронов от 6 до 70 эВ и в интервале температур 400–600 К. Масс-спектр состоит из трёх групп пиков, соответствующих атомарным Te^+ , молекулярным Te_2^+ и двухзарядным Te^{2+} ионам теллура. Показано, что отношение интенсивности изотопных пиков к основному сохраняется как для атомарных, так и для молекулярных ионов. Найдено, что в газовой фазе при температурах эксперимента преобладают двухатомные молекулы теллура. Исследованы функции ионизации ионов Te^+ , Te_2^+ и Te^{2+} и методом наименьших квадратов по пороговым участкам кривых определены значения энергий появления и ионизации молекулярных и атомарных ионов теллура. Впервые в масс-спектре теллура найдено двухзарядный ион Te_2^{2+} , для которого получена энергетическая зависимость ионизации электронным ударом и определена энергия ионизации, равная $E = 20,6 \pm 0,25$ эВ.

Ключевые слова: ионизация, электронный удар, теллур, энергия появления.

О.В. Shpenik, А.М. Zavilopulo, О.В. Pylypchynets

Institute of Electronic Physics of the NAS of Ukraine, Uzhhorod

E-mail: gzavil@gmail.com

ELECTRON IMPACT IONIZATION OF TELLURIUM IN THE GAS PHASE

The processes of ionization of tellurium in the gas phase by the electron impact have been studied by mass spectrometry, by using the technique of intersecting beams. The mass spectra of tellurium are studied in the range of mass numbers 50–350 Da at various energies of ionizing electrons from 6 to 70 eV and in the temperature range 400–600 K. The mass spectrum consists of three groups of peaks corresponding to atomic Te^+ , molecular Te_2^+ , and doubly charged Te^{2+} ions. It is shown that the ratio of the intensity of isotope peaks to the main one is conserved for both atomic and molecular ions. It is found that diatomic tellurium molecules prevail in the gas phase at experimental temperatures. The ionization functions of Te^+ , Te_2^+ , and Te^{2+} ions and the energies of appearance and ionization of molecular and atomic tellurium ions are determined by the method of least squares over the threshold sections of the curves. For the first time in the mass spectra of tellurium, a doubly charged Te_2^{2+} ion is found, for which the energy dependence of the ionization by the electron impact is obtained, and the ionization energy $E = 20.6 \pm 0.25$ eV is determined.

Keywords: ionization, electron impact, tellurium, energy of appearance.