

Z Katedry Fizyki Doświadczalnej Wydziału Mat. Fiz. Chem. UMCS

Kierownik: prof. dr Włodzimierz Żuk

Bogdan ADAMCZYK

**Empiryczne sformułowanie wartości przekrojów czynnych He, Ne i Ar
na jonizację pojedynczą i wielokrotną elektronami**

Эмпирическая формулировка значений сечений He, Ne и Ar
на единичную и многократную ионизацию электронами

Empirical Cross Section Formulae for Single and Multiple Ionization of He, Ne
and Ar by Electrons

WSTĘP

Opublikowane przez wielu autorów wyniki pomiarów przekrojów czynnych atomów gazów szlachetnych na jonizację pojedynczą i wielokrotną elektronami różnią się między sobą znacznie, w niektórych przypadkach nawet kilkakrotnie [1—12]. Niezgodność ta dotyczy nie tylko wartości przekrojów, lecz również przebiegu funkcji obrazującej zależność przekroju od energii elektronów. Ten stan spowodowany został efektami wybiórczymi spektrometrów mas, przy których pomocy wykonane były pomiary (zagadnienie to opisano szerzej w poprzedniej pracy [13]). Wyniki te nie mogą więc stanowić podstawy do jednoznacznego sprawdzenia poprawności wzorów wiążących ze sobą wartość przekroju czynnego, energię bombardujących elektronów oraz stałe dotyczące danego atomu, z których najistotniejsza w omawianych procesach jest energia jonizacji. Poszczególne wzory sformułowane zostały bądź na drodze czysto teoretycznej, bądź też na drodze pół- lub całkowicie empirycznej.

Thomson [14] oraz między innymi Webster, Hansen i Duveneck [15], Elwert [16], a ostatnio także Gryziński [17], oparli swoje wzory na równaniach elektrodynamiki klasycznej. Bethe [18], posługując się przybliżeniem Borna, wyprowadził swój wzór na gruncie mechaniki falowej. Wzór ten był następnie inspiracją do opracowania wzorów przez de la Ripelle'a [19], Vriensa [20],

a także Schrama i Vriensa [21]. Autorami czysto empirycznych wzorów są Margulis [22] i Drawin [23].

Poniżej podany jest przegląd wzorów opracowanych przez tych autorów. Cytując je, iloczyny i ilorazy stałych wzorów, występujących w oryginalnej wersji, zastąpiono przez jedną stałą A , B lub C . Dzięki temu podkreślony został przebieg funkcji

$$\sigma = f(E, E_i)$$

gdzie: σ — przekrój czynny na jonizację, E — energia elektronów bombardujących atomy, E_i — energia jonizacji atomu. Występujący w niektórych wzorach symbol U oznacza stosunek E/E_i .

Thomson:

$$\sigma = \frac{A}{E} \left[\frac{1}{E_i} - \frac{1}{E} \right]$$

Webster, Hansen i Duveneck:

$$\sigma = \frac{A}{E_i^2} \frac{U-1}{U^2} \left[1 - \frac{2}{3} \frac{U-1}{U} \right]$$

Elwert:

$$\sigma = \frac{A}{E_i^2} \frac{U-1}{U^2} [1 + 0,3(U-1)]$$

Gryziński:

$$\sigma = \frac{A}{E_i^2} \frac{1}{U} \left(\frac{U-1}{U+1} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{2U} \right) \ln(2,7 + \sqrt{U-1}) \right]$$

Bethe:

$$\sigma = \frac{A}{E E_i} \ln B \frac{E}{E_i}$$

de la Ripelle:

$$\sigma = \frac{A}{E_i} \frac{\ln B U}{U+C}$$

Vriens:

$$\sigma = A C \frac{E-E_i}{E^2} \ln [1 + B(E-E_i)]$$

gdzie

$$C = 1 + (1 - B E_i) (0,025 + \frac{1,6}{B E_i}) \left(1 - \frac{E_i}{E} \right) \left(\frac{E_i}{E} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Schram i Vriens:

$$\sigma = \frac{A}{E} \ln C E + \frac{B}{E}$$

Margulis:

$$\sigma = A (E - E_i) e - \frac{1}{B} (E - E_i)$$

Drawin:

$$\sigma = \frac{A}{E_i^2} \frac{U-1}{U^2} \ln B U$$

Przytoczone wzory w zasadzie dotyczą przekrojów czynnych na jonizację pojedynczą, a ich zgodność z doświadczeniem jest różna dla różnych zakresów energii elektronów. Poza tym wzory opracowane na drodze empirycznej w oparciu o konkretne dane eksperymentalne nie są zadowalająco sprawdzalne przez dane uzyskane w innym eksperymencie przez innego autora.

PROPONOWANY WZÓR EMPIRYCZNY

Posługując się specjalnie skonstruowanym spektrometrem mas [24], w którym transmisja jonów pomiędzy miejscem ich wytwarzania w źródle a kolektorem była całkowita, wykluczono efekty wybiórcze, charakterystyczne dla spektrometrów konwencjonalnych z małymi współczynnikami transmisji. Przy pomocy tego spektrometru wykonano pomiary przekrojów czynnych na jonizację pojedynczą i wielokrotną atomów He, Ne i Ar elektronami o energii od 25 do 600 eV [13]. Uzyskane wyniki są w dobrej zgodności z następującym zaproponowanym wzorem empirycznym:

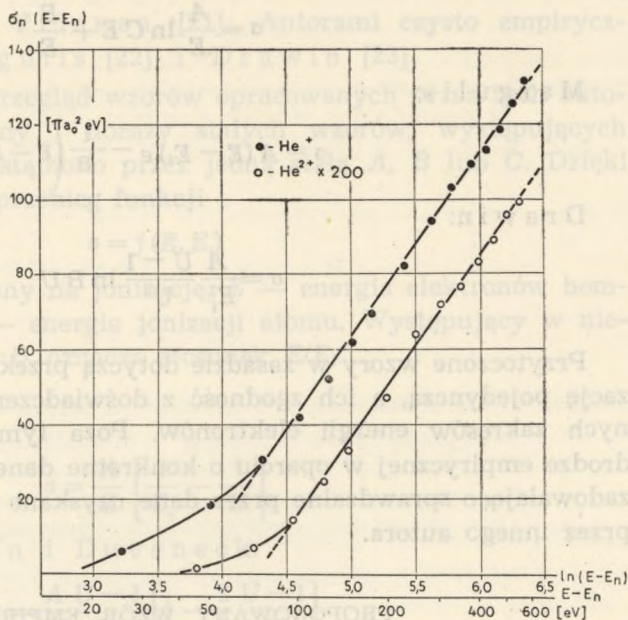
$$\sigma_n = \frac{A \ln B (E - E_n)}{E - E_n} \quad (1)$$

gdzie: σ_n — przekrój czynny na wytworzenie jonu o n -krotnym ładunku elementarnym, E — energia jonów bombardujących atom, E_n — energia jonizacji potrzebna do n -krotnego zjonizowania atomu, A i B — stałe, których wartość zależy od rodzaju atomu i krotności jonizacji. Wzór (1) można zapisać w postaci:

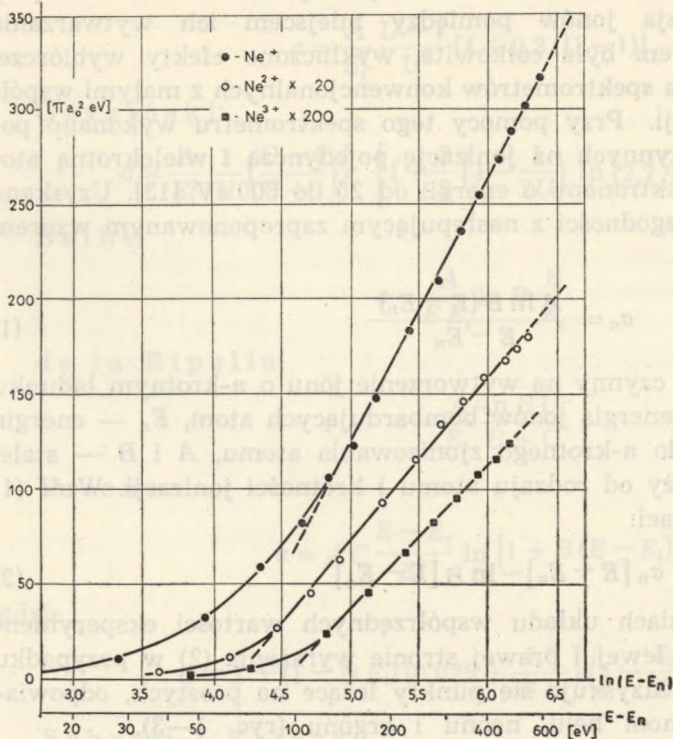
$$\sigma_n [E - E_n] \sim \ln B [E - E_n] \quad (2)$$

Odkładając na osiach układu współrzędnych wartości eksperymentalne, odpowiadające lewej i prawej stronie wyrażenia (2) w przypadku słuszności wzoru (1), uzyskuje się punkty leżące na prostych, odpowiadających kolejno jonom helu, neonu i argonu (ryc. 1—3).

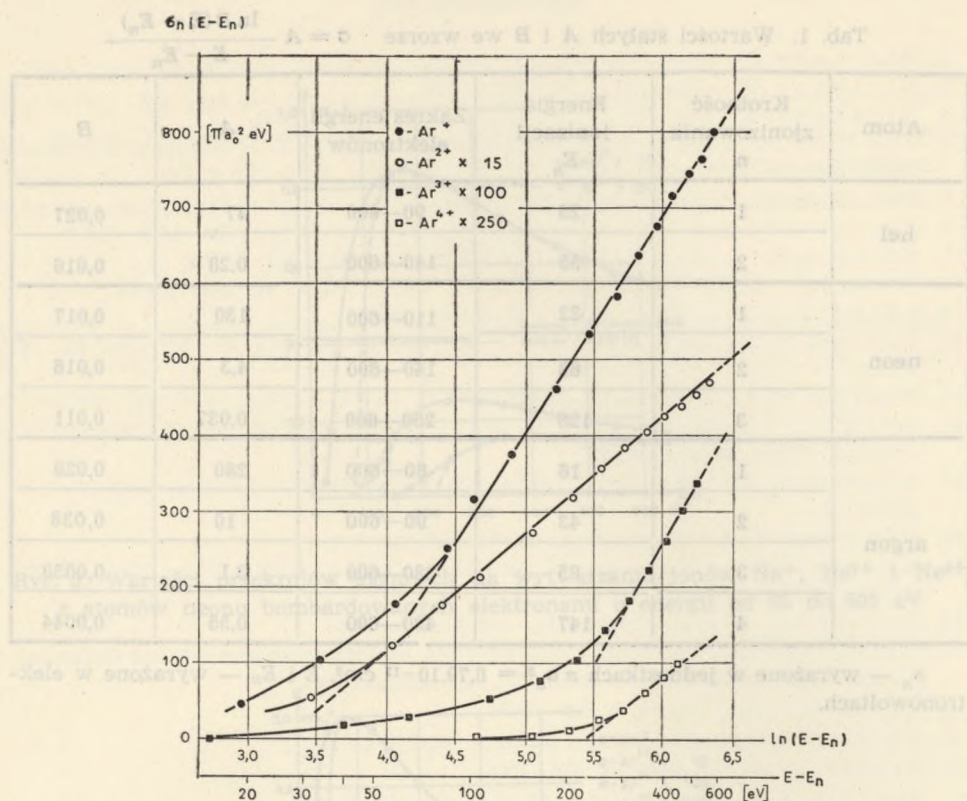
Ryc. 1. Zależność $\sigma_n(E-E_n)$ od $\ln(E-E_n)$ dla jonów He^+ i He^{2+} , uzyskanych z atomów helu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV.



$\sigma_n(E-E_n)$



Ryc. 2. Zależność $\sigma_n(E-E_n)$ od $\ln(E-E_n)$ dla jonów Ne^+ , Ne^{2+} i Ne^{3+} , uzyskanych z atomów neonu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV.



Ryc. 3. Zależność $\sigma_n(E-E_n)$ od $\ln(E-E_n)$ dla jonów Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} i Ar^{4+} , uzyskanych z atomów argonu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV

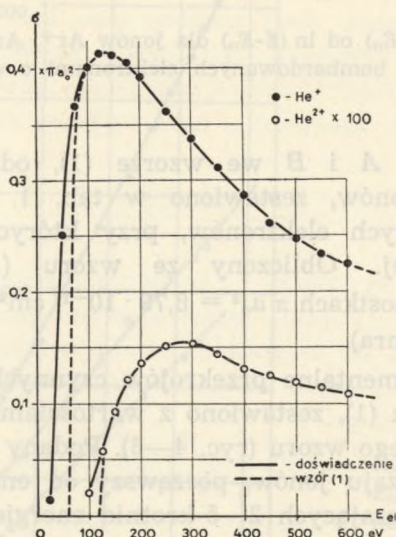
Wartości stałych A i B we wzorze (1), odpowiadające poszczególnym rodzajom jonów, zestawiono w tab. 1. Podano też zakresy energii bombardujących elektronów, przy których można zastosować daną wartość stałej. Obliczony ze wzoru (1) przekrój czynny wyrażony jest w jednostkach $\pi a_0^2 = 8,79 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ (a_0 — promień pierwszej orbity atomu Bohra).

Wartości eksperymentalne przekrojów czynnych, które posłużyły do sformułowania wzoru (1), zestawiono z wartościami przekrojów, obliczonymi na podstawie tego wzoru (ryc. 4—6). Podany wzór można stosować w zależności od rodzaju jonów, począwszy od energii bombardujących elektronów, przewyższających 2—5-krotnie energię jonizacji. Ze względów praktycznych istotna jest dobra zgodność wzoru z doświadczeniem w zakresie energii elektronów, obejmujących maksymalne wartości przekrojów.

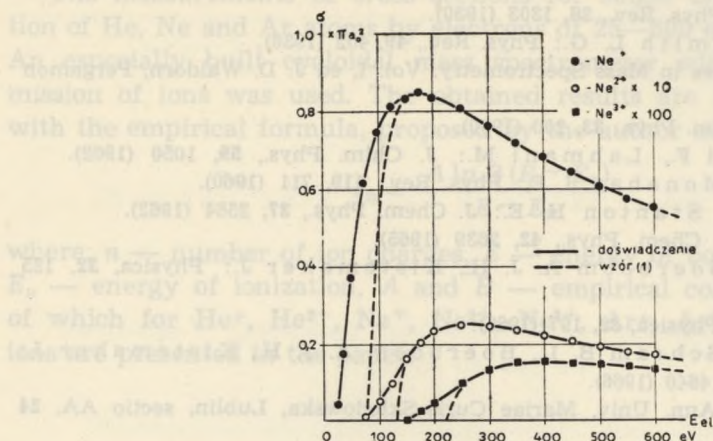
Tab. 1. Wartości stałych A i B we wzorze $\sigma = A \frac{\ln B(E - E_n)}{E - E_n}$

Atom	Krotność zjonizowania n	Energia jonizacji E_n	Zakres energii elektronów	A	B
hel	1	25	90—600	47	0,027
	2	55	140—600	0,28	0,016
neon	1	22	110—600	130	0,017
	2	63	140—600	4,3	0,016
	3	128	250—600	0,037	0,011
argon	1	16	80—600	280	0,029
	2	43	90—600	10	0,038
	3	85	380—600	3,1	0,0058
	4	147	430—600	0,55	0,0044

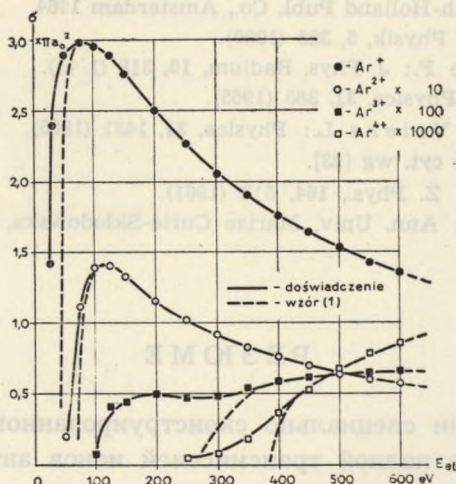
σ_n — wyrażone w jednostkach $\pi a_0^2 = 8,79 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$, E i E_n — wyrażone w elektronowoltach.



Ryc. 4. Wartości przekrojów czynnych na wytwarzanie jonów He^+ i He^{2+} z atomów helu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV



Ryc. 5. Wartości przekrojów czynnych na wytwarzanie jonów Ne^+ , Ne^{2+} i Ne^{3+} z atomów neonu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV



Ryc. 6. Wartości przekrojów czynnych na wytwarzanie jonów Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} i Ar^{4+} z atomów argonu bombardowanych elektronami o energii od 25 do 600 eV

Przedstawiony wzór oraz wartości dwóch stałych Ar^+ mogą być podstawą do rozważań teoretycznych, dotyczących procesów jonizacji pojedynczej i wielokrotnej atomów elektronami.

PIŚMIENICTWO

1. Bleakney W.: Phys. Rev., **34**, 157 (1929).
2. Bleakney W.: Phys. Rev., **36**, 1303 (1930).
3. Bleakney W., Smith L. G.: Phys. Rev., **49**, 402 (1936).
4. Fox R. E.: Advances in Mass Spectrometry. Vol. I, ed J. D. Waldorn, Pergamon Press, London 1959.
5. Fox R. E.: J. Chem. Phys., **33**, 200 (1960).
6. Fiquet-Fayard F., Lahmani M.: J. Chim. Phys., **59**, 1050 (1962).
7. Stanton H. E., Monahan J. E.: Phys. Rev., **119**, 711 (1960).
8. Monahan J. E., Stanton H. E.: J. Chem. Phys., **37**, 2564 (1962).
9. Stuber F. A.: J. Chem. Phys., **42**, 2639 (1965).
10. Schram B. L., Boerboom A. J. H., Kistemaker J.: Physica, **32**, 185 (1966).
11. Schram B. L.: Physica, **32**, 197 (1966).
12. Adamczyk B., Schram B. L., Boerboom A. J. H., Kistemaker J.: J. Chem. Phys., **44**, 4640 (1966).
13. Adamczyk B.: Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, Lublin, sectio AA, **24** (1969).
14. Thomson J. J.: Philos. Mag., **23**, 449 (1912).
15. Webster D. L., Hansen W. W., Duveneck F. B.: Phys. Rev., **43**, 839 (1933).
16. Elwert G.: Z. Naturforsch., **7a**, 432 (1952).
17. Gryziński M.: Third Int. Conf. on Phys. of Electronic and Atomic Collisions, London 1963, North-Holland Publ. Co., Amsterdam 1964.
18. Bethe H.: Ann. Physik, **5**, 325 (1930).
19. De la Ripelle F.: J. Phys. Radium, **10**, 318 (1943).
20. Vriens L. A.: Physica, **31**, 385 (1965).
21. Schram B. L., Vriens L.: Physica, **31**, 1431 (1965).
22. Margulis N. — cyt. wg [23].
23. Drawin H. W.: Z. Phys., **164**, 513 (1961).
24. Adamczyk B.: Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, Lublin, sectio AA, **24** (1969).

РЕЗЮМЕ

При применении специально сконструированного циклоидального масспектрометра с полной трансмиссией ионов автор измерил сечения на единичную и многократную ионизацию атомов He, Ne и Ar электронами с энергией от 25 до 600 eV. Полученные результаты представлены по предложенной автором формуле: $\sigma_n = \frac{A \ln B (E - E_n)}{E - E_n}$ где:

E — энергия бомбардирующих элементов; E_n — энергия необходимая для n -кратного ионизирования атома. Также даны значения постоянных A и B для ионов He^+ , He^{2+} , Ne^+ , Ne^{2+} , Ne^{3+} , Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} , Ar^{4+} .

SUMMARY

The measurements of cross sections for single and multiple ionization of He, Ne and Ar atoms by electrons of 25—600 eV were performed. An especially built cycloidal mass spectrometer with the total transmission of ions was used. The obtained results are in good agreement with the empirical formula, proposed by the author of the present work:

$$\sigma_n = \frac{A \ln B (E - E_n)}{E - E_n}$$

where: n — number of ion charges, E — energy of bombarded electrons, E_n — energy of ionization, A and B — empirical constants, the values of which for He^+ , He^{2+} , Ne^+ , Ne^{2+} , Ne^{3+} , Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} and Ar^{4+} ions are presented in the paper.

