

Unipolarny filtr mas z wysokoczułym detektorem jonów

Witold K. MICHNOWSKI, Wojciech E. LENKOW

Streszczenie

W pracy przedstawiono zasadę działania kwadrupolowego filtru mas (QFM) i jego odmiany — unipolarnego filtru mas (UFM). Szereg korzystnych własności (prosta budowa, zwartość konstrukcji, niewrażliwość na zakłócenia zewnętrzne i rozdzielczość w szerokim zakresie analizowanych mas) preferują unipolarny filtr mas jako urządzenie analizujące w układach próżniowych. Opisano konstrukcję UFM z powielaczem elektronowym jako detektorem jonów i przedstawiono wyniki zastosowania tego urządzenia do analizy gazów resztkowych w metalowej aparaturze wysokopróżniowej. Osiągnięto 22-krotne zwiększenie czułości układu w stosunku do rozwiązań dotychczas stosowanych, przy ciśnieniu $2 \cdot 10^{-4}$ hPa ($1,5 \cdot 10^{-4}$ Tr) i 100-krotne wzmocnienie przy ciśnieniu $2,7 \cdot 10^{-8}$ hPa ($2 \cdot 10^{-8}$ Tr).

Próżniomierze wszelkich typów mierzą ciśnienie całkowite, tzn. sumę ciśnień wszystkich gazów w układzie próżniowym. W stanie końcowym są to resztki gazów, pary różnych substancji znajdujących się w aparaturze, jak również gazy powstałe z rozkładu tych substancji. Skład środowiska gazowego może być różnorodny, co nie pozostaje bez wpływu na prowadzone w aparaturze próżniowej badania i procesy technologiczne. Wraz z rozwojem techniki wysokiej i ultrawysokiej próżni, a także potrzeb przemysłowych, w coraz mniejszym stopniu wystarczała znajomość tylko ciśnienia całkowitego i coraz częściej występowała konieczność znajomości składu środowiska gazowego i ciśnienia poszczególnych jego składników. Intensywne prace prowadzone w wielu krajach doprowadziły do opracowania przyrządów spełniających wyżej wymienione warunki. Urządzenia do analizy składu gazów resztkowych, [2] zwane spektrometrami mas różnych typów (np. trochotron, omegatron, topatron itp.) mimo swych niewątpliwych zalet, posiadają jednak szereg wad: duże rozmiary, duże masy i powierzchnie stykające się z próżnią, konieczność użycia silnych pól magnetycznych, konieczność użycia dużego oprzyrządowania, stosunkowo mała zdolność rozdzielcza. Liczne zalety unipolarnego filtru mas (prosta konstrukcja, duża czułość, duża zdolność rozdzielcza, możliwość pracy w szerokim zakresie ciśnień) wyróżniają go jako uniwersalny spektrometr do badania składu gazów w układach próżniowych.

Obok zdolności rozdzielczej bardzo ważnym parametrem spektrometru masowego jest jego czułość określająca dolną granicę ciśnień parcyjnych mierzonych za pomocą tego urządzenia.

W przedstawionej pracy podano wyniki eksperymentu mającego na celu zwiększenie czułości klasycznej głowicy UFM, za pośrednictwem bezpośredniego wzmocnienia prądu jonowego, przy pomocy wmontowanego wewnątrz głowicy, powielacza elektronowego typu FMD 16/19.

1. ZASADA DZIAŁANIA

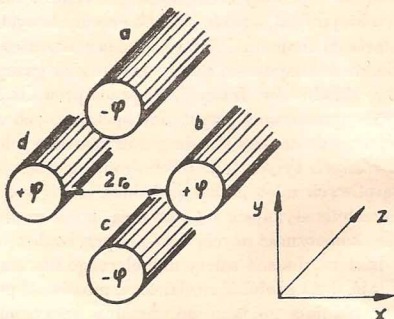
Zasadę działania spektrometru UFM można wyjaśnić korzystając z teorii kwadrupolowego filtru mas (QFM). Teoria ta podana jest w pracach [5, 6, 7,] szczegółowa jej analiza — w pracy [3]. Rozważania zamieszczone poniżej ograniczają się jedynie do podania niezbędnego zarysu tej teorii.

Rozkład potencjału wewnątrz kwadrupolowego filtru mas (rys. 1), w którym porusza się wzdłuż osi z cząstka o masie m i ładunku e jest ukształtowany odpowiednimi napięciami elektrycznymi elektrod a,b,c,d tak, by dał się on określić jako kwadratowa funkcja współrzędnych x oraz y :

$$\varphi = (U - V \cos \omega t) \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \quad (1)$$

Stąd równania ruchu cząstki można zapisać jako:

$$\begin{aligned} \frac{m\ddot{x} - 2e(U + V \cos \omega t)x}{r_0^2} &= 0 \\ \frac{m\ddot{y} + 2e(U + V \cos \omega t)y}{r_0^2} &= 0 \\ m\ddot{z} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$



Rysunek 1. Rozkład potencjału wewnątrz kwadrupolowego układu elektrod.

Dwa pierwsze równania są równaniami różniczkowymi Mathieu. Szczegółowe ich rozwiązanie znajduje się w pracy [1]. Wprowadzając oznaczenia:

$$\omega t = 2\varepsilon, \quad a = \frac{8eU}{mr_0^2\omega^2}, \quad q = \frac{4eV}{mr_0^2\omega^2} \quad (3)$$

przy czym:

m — masa jonu,
 ω — pulsacja napięcia przemiennego,
 U — napięcie stałe,
 V — napięcie przemienne,
 $2r_0$ — odległość pomiędzy elektrodami filtru,

dwa pierwsze równania (2) można zapisać w postaci:

$$\ddot{x} - (a + 2q \cos 2\varepsilon)x = 0$$

$$\ddot{y} + (a + 2q \cos 2\varepsilon)y = 0$$

Rozwiązanie ogólne równania Mathieu ma postać:

$$y = A \exp \mu \varepsilon \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp jn\varepsilon + B \exp (-\mu \varepsilon) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp (-jn\varepsilon) \quad (5)$$

gdzie:

A i B — stałe

C_n oraz μ — stałe zależne od wielkości a i q

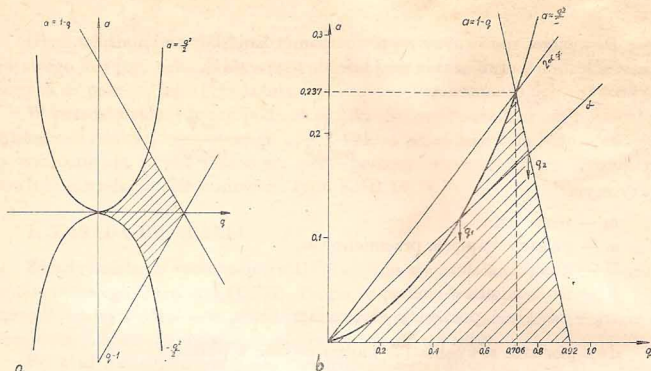
Stąd uzyskuje się dwie klasy rozwiązań w zależności od stałej μ .

Jeżeli $\mu = j\beta$, a $0 < \beta < 1$ przybiera wartości rzeczywiste, rozwiązanie równania (5) jest stabilne i okresowe. Jeśli $\mu = jn$ (gdzie n — dowolna liczba całkowita), mamy do czynienia z nietrywialnym rozwiązaniem stabilnym i okresowym. Jeśli wielkość μ zawiera część rzeczywistą, rozwiązanie jest niestabilne. Działanie analizatora możliwe jest tylko w obszarze rozwiązań stabilnych (zakresowany obszar wykresu na rys. 2a), a więc dla odpowiednich wartości parametru a oraz q [5].

Ze szczegółowej analizy obszaru rozwiązań stabilnych wynika, że krzywe ograniczające ten obszar są określone w układzie współrzędnych q vs a , zależnościami:

$a \approx 1 - q$, oraz $a \approx \frac{q^2}{2}$, przy czym ze względów praktycznych ograniczamy się tylko do dodatnich wartości a i q . Rysunek 2b przedstawia typowy diagram stabilności kwadrupolowego filtru mas [6].

Parametry a i q można zmieniać przez zmianę napięcia stałego U , przez zmianę napięcia przemiennego V lub przez zmianę częstości ω . Gdy $\omega = \text{const}$, w płaszczyźnie aq , każdej masie m odpowiada jeden punkt (np. a_1, q_1), określony przez dane U i V . W zależności od tego, gdzie znajdują się współrzędne tego punktu (w obszarze rozwiązań stabilnych lub poza tym obszarem), jon bądź



Rysunek 2 a) Diagram rozwiązań stabilnych równania różniczkowego Mathieu (zakreskowano obszar interesujący, ze względu na funkcjonowanie QFM).
b) Analiza stabilnych warunków pracy QFM.

przejdzie przez analizator, bądź jego ruch będzie miał charakter drgania o wzrastającej amplitudzie i zostanie on wychwycony przez elektrody.

Najdogodniejszy sposób uzyskania widma mas polega na takim zmienianiu wartości U i V , aby ich stosunek był stały:

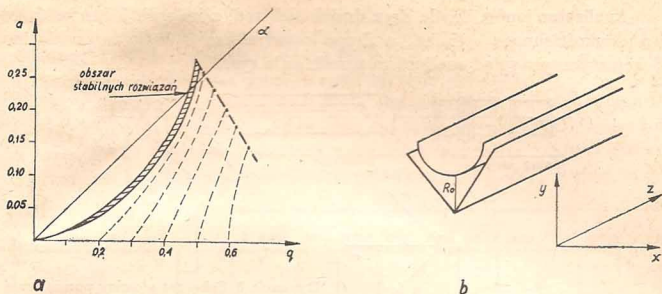
$$\frac{a}{q} = 2 \frac{U}{V} = 2\alpha \quad (6)$$

(Jest to równanie prostej przechodzącej przez początek układu na diagramie stabilności). W zależności od wartości parametru a/q względem $2\alpha_{gr}$ (dla $\alpha_{gr} = 0,168$) przez analizator przejdą lub zostaną wylapane odpowiednie jony: Jeżeli $a/q > 2\alpha_{gr}$ żaden jon nie przejdzie przez analizator. Jeżeli $a/q = 2\alpha_{gr}$ przejdą tylko te jony, dla których $q = q_{gr} = 0,706$ i $a = a_{gr} = 0,237$.

Jeżeli $a/q < 2\alpha_{gr}$ przejdą jony o różnych masach, dla których q (lub a) będą zawarte w przedziale $\Delta q = q_2 - q_1$.

Gdy przyrząd ma rozdzielić dwie masy różniące się o Δm , to odpowiadające im wartości (przy danym U/V) $q = 4eV/mr_0^2\omega^2$ i $q' = 4eV/(m + \Delta m)r_0^2\omega^2$ muszą się różnić o Δq . Stąd $q - q' \geq \Delta q$. Z powyższych rozważań wynika, że zdolność rozdzielacza będzie zależała od nachylenia prostej przechodzącej przez obszar rozwiązań stabilnych [6].

Przedstawione wyżej rozważania zachowują swą słuszność także dla unipolarnego filtru mas. W tym przypadku ruch jonów w kierunku osi z nie ulega zmianie, co powoduje identyczność rozwiązań równania Mathieu jak w przypadku QFM. Ograniczenie ruchu jonów następuje w kierunku osi x oraz y , co prowadzi do zawężenia obszaru rozwiązań stabilnych. Diagram stabilności dla unipolarnego filtru mas będzie miał kształt przedstawiony na rys. 3 [5].



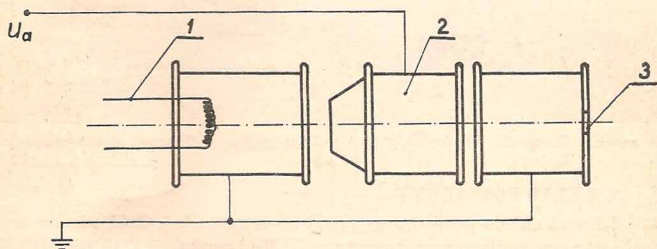
Rysunek 3 a) Diagram stabilności unipolarnego filtru mas.
b) Schematyczny kształt elektrod analizatora.

Takie ukształtowanie obszaru stabilnych rozwiązań wykazuje przewagę UFM w stosunku do QFM pod względem łatwiejszego doboru warunków pracy urządzenia o dużej rozdzielczości masowej.

2. BUDOWA GŁOWICY POMIAROWEJ

Na podstawie danych zawartych w pracy Chrzanowskiego i Mroza [4] wykonano głowicę unipolarnego filtru mas. Składa się ona ze źródła jonów, analizatora i kolektora jonów.

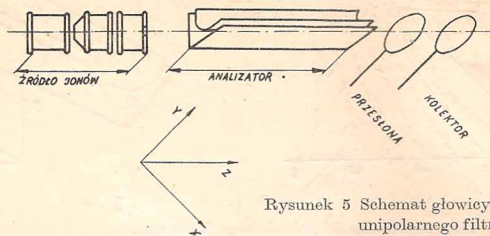
Trójelektrodowe źródło jonów (rys. 4) zawiera trzy ułożone jeden za drugim cylindry metalowe oraz umieszczoną wewnątrz pierwszego cylindra żarzoną katodę. Montaż całości musi być wykonany z dokładnością $\pm 0,02$ mm. Tak wysoką dokładność osiąga się za pomocą specjalnych ceramicznych tulejek dystansowych i izolatorów.



Rysunek 4 Źródło jonów 1-katoda, 2-obszar formowania wiązki jonów, 3-przysłona wyjściowa.

Katodę źródła jonów wykonano z drutu wolframowego o średnicy 0,1 mm. Zapewnia ona możliwość uzyskania prądu roboczego wiązki przy prądzie żarzenia 0,5 A.

Analizator jonów składa się z dwóch elektrod, z których jedna jest połową cienkościennego cylindra, a druga kątownikiem o kącie rozwarcia 90° . Schematyczny wygląd analizatora przedstawia rys. 5.

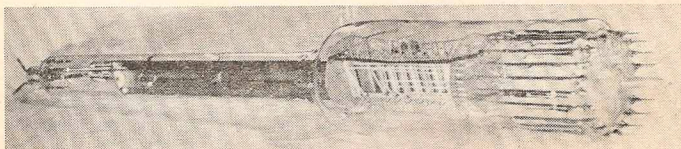


Rysunek 5 Schemat głowicy pomiarowej unipolarnego filtra mas.

Dokładność wykonania i montażu urządzenia musi się zawierać w granicach $\pm 0,01$ mm, co można osiągnąć przez zastosowanie specjalnych elementów łączących, wykonanych z ceramiki alundowej [4].

Ogólny widok głowicy unipolarnego filtra mas z powielaczem elektronowym przedstawia fotografia na rysunku 6.

Detektor jonów. Jako detektora jonów użyto 19-to dynodowego powielacza elektronowego Cu — Be typu FMD 16/19. Pierwsza dynoda powielacza spełnia funkcję kolektora jonów. Poszczególne dynody zasilano z zewnętrznego dzielnika napięcia. Całość zamocowano w odpowiednio uformowanej obudowie ze szkła twardego typu SL — 52,1. Wszystkie przepusty próżniowe, doprowadzające napięcie do elektrod UFM, zostały pozłoczone celem uzyskania pewnego kontaktu elektrycznego. W ten sposób wykonana głowica UFM może być odgazowana pod próżnią do temperatury 420°C .



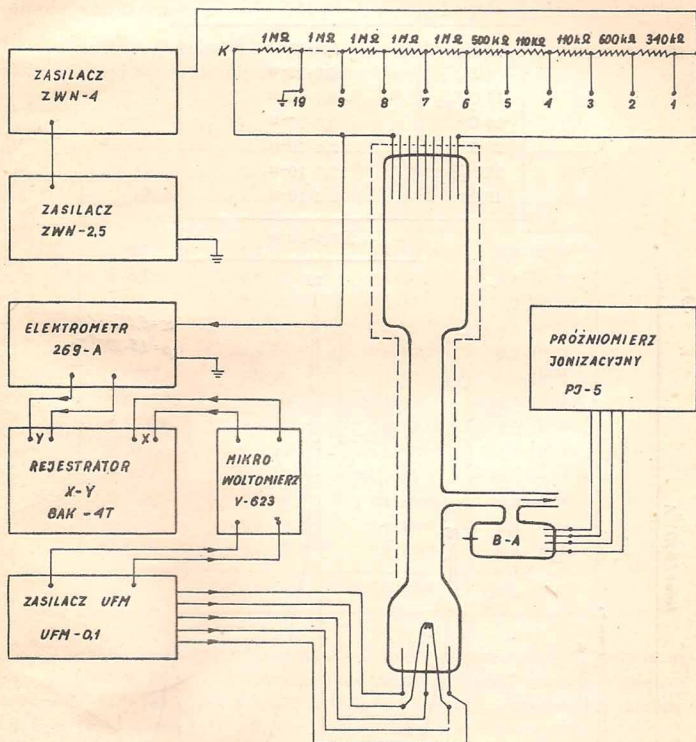
Rysunek 6 Fotografia głowicy unipolarnego filtra mas z powielaczem elektronowym na wyjściu.

3. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 7. Źródło jonów oraz analizator mas zasilano z zasilacza typu UFM-01 produkcji ZD CHEMIPAN. Głowica unipolarnego filtra mas pracowała przy następujących wartościach napięć i prądów zasilających:

1. Napięcie żarzenia katody 3,9 V
2. Natężenie prądu wiązki elektronowej $800 \mu\text{A}$
3. Napięcie anodowe źródła jonów $(100 \pm 0,1)$ V.

4. Napięcie analizujące przemienne o amplitudzie regulowanej ręcznie lub automatycznie w granicach od 0,4 do 1000 V.
5. Napięcie stałe. Podczas pomiaru ustalono stały stosunek $\alpha = U/V = 0,113$. Dla takiej wartości α składowa stała potencjału analizującego, wyrażona w woltach, równa jest liczbowo masie analizowanego jonu w j.m.a. Praca analizatora w takich warunkach umożliwia analizowanie mas w przedziale 1—110 j.m.a. z szerokością połówkową piku $\Delta M_{0,5}$ poniżej 1 j.m.a.



Rysunek 7. Schemat układu pomiarowego.

4. WYNIKI POMIARÓW

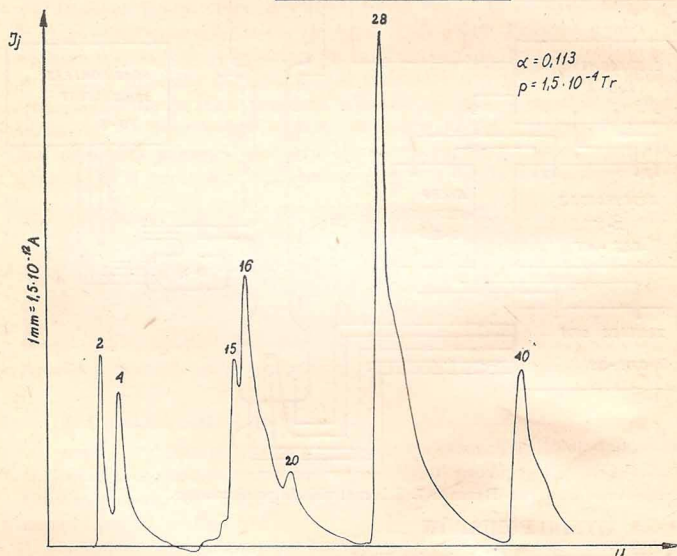
a) Wyznaczanie czułości głowicy UFM

W celu wyznaczenia czułości samej głowicy użyto jako kolektor jonów pierwszą dynodę powielacza nie pracującego. Wykres 1 przedstawia zapis widma

mas w funkcji zmiany składowej stałej potencjału analizującego dla $\alpha = 0,113$. Ocenę czułości głowicy UFM przeprowadzono w sposób uproszczony sumując natężenia prądów jonowych wszystkich pików i odnosząc je do całkowitego ciśnienia gazów mierzonego głowicą B—A. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1:

Tabela 1

M	Prąd jonowy
[j.m.a.]	[A]
2 H_2^+	$7,8 \cdot 10^{-11}$
4 H_e^+	$6,0 \cdot 10^{-11}$
15 CH_3^+	$6,7 \cdot 10^{-11}$
16 O^+	$9,6 \cdot 10^{-11}$
20 A^{++}	$2,4 \cdot 10^{-11}$
28 N_2^+	$17,3 \cdot 10^{-11}$
40 A^+	$5,2 \cdot 10^{-11}$
$\Sigma 5,5 \cdot 10^{-10}$	



Wykres 1. Zapis widma mas w funkcji zmiany składowej stałej potencjału analizującego, klasycznej głowicy UFM $p = 1,5 \cdot 10^{-4} Tr$.

Czułość głowicy, obliczona ze wzoru:

$$S = \frac{I_j}{p} \quad (7)$$

I_j — natężenie prądu jonowego,

p — ciśnienie całkowite gazu mierzone głowicą B—A, jest rzędu $2,8 \cdot 10^{-6}$ A/hPa ($3,6 \cdot 10^{-6}$ A/Tr), a więc mieści się w przedziale czułości tego rodzaju głowic [4].

b) Wyznaczanie czułości głowicy UFM z powielaczem elektronowym jako dektorem wiązki jonowej.

Stwierdzono, że wzmocnienie powielacza elektronowego w dużym stopniu zależy od przyłożonego napięcia przyspieszającego.

Tabela 2

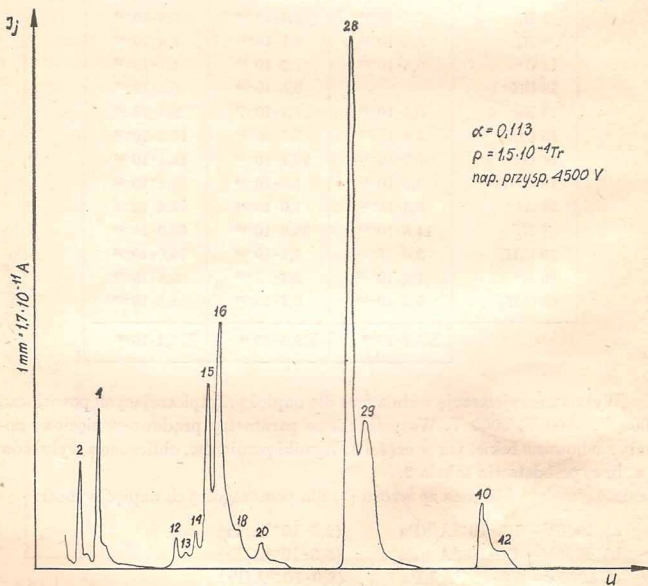
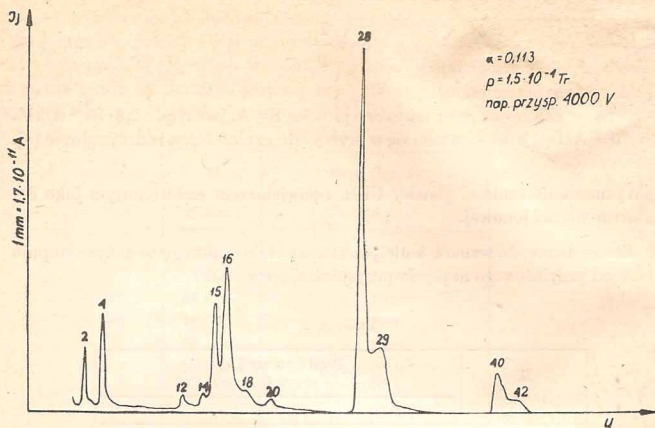
M [j.m.a.]	Prąd jonowy [A] Napięcie przyspieszające [V]		
	4000 V	4500 V	5000 V
2 H_2^+	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$
4 He^+	$3,6 \cdot 10^{-10}$	$6,1 \cdot 10^{-10}$	$8,6 \cdot 10^{-10}$
12 C^+	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$
13 CH^+		$0,5 \cdot 10^{-10}$	$0,8 \cdot 10^{-10}$
14 N_2^{++}	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$
15 CH_3^+	$3,6 \cdot 10^{-10}$	$7,7 \cdot 10^{-10}$	$10,2 \cdot 10^{-10}$
16 O^+	$5,7 \cdot 10^{-10}$	$10,1 \cdot 10^{-10}$	$14,1 \cdot 10^{-10}$
18 HOH^+	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
20 A^{++}	$0,3 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
28 N_2^+	$14,8 \cdot 10^{-10}$	$36,6 \cdot 10^{-10}$	$60,0 \cdot 10^{-10}$
29 $C_2H_5^+$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$6,1 \cdot 10^{-10}$	$10,0 \cdot 10^{-10}$
40 A^+	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$
42 $C_3H_6^+$	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$0,7 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
	$\Sigma 3,8 \cdot 10^{-9}$	$\Sigma 8,0 \cdot 10^{-9}$	$\Sigma 1,2 \cdot 10^{-8}$

Wykonano rejestrację widma mas dla napięć przyspieszających powielacza 4000 V, 4500 V, 5000 V. Wszystkie inne parametry prądowo-napięciowe zostały zachowane takie, jak w części 3. Wyniki pomiarów, obliczone z wykresów 2 a, b, c, przedstawia tabela 2.

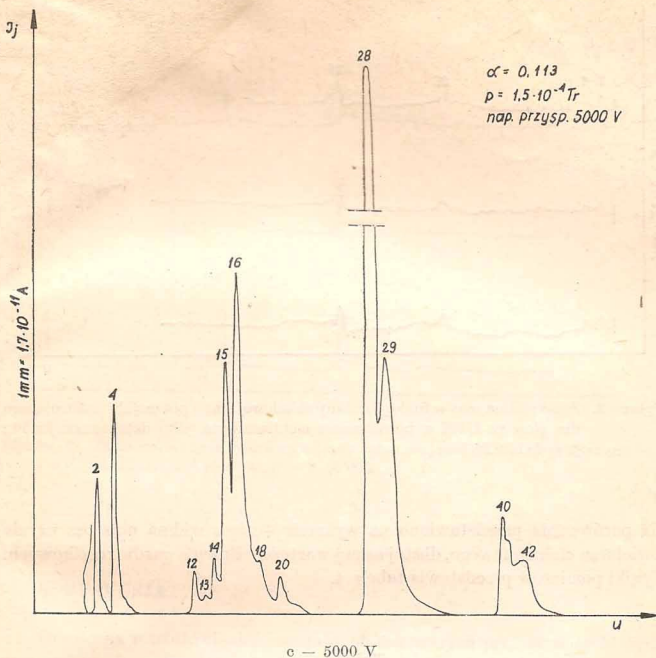
Czułość głowicy obliczona ze wzoru (7) dla poszczególnych napięć wynosi:

- a) 4000V— $1,9 \cdot 10^{-5}$ A/hPa ($2,5 \cdot 10^{-5}$ A/Tr)
- b) 4500V— $4,0 \cdot 10^{-5}$ A/hPa ($5,3 \cdot 10^{-5}$ A/Tr)
- c) 5000V— $6,0 \cdot 10^{-5}$ A/hPa ($8,0 \cdot 10^{-5}$ A/Tr)

Wykresy 2abc. Zapis widma mas w funkcji zmiany składowej stałej potencjału analizującego, dla różnych napięć zasilających powielacz elektronowy;
a — 4000 V,



b — 4500 V,

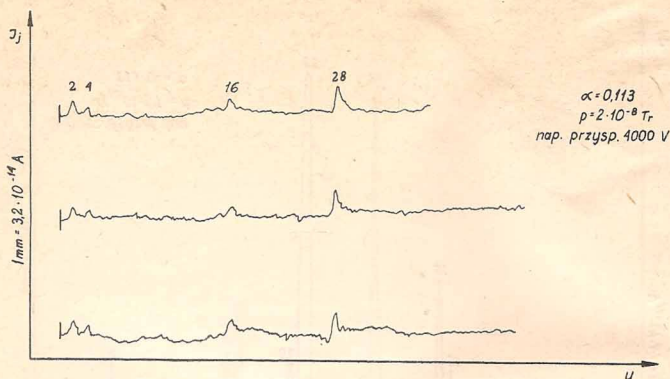


Wyliczona z tabeli 3, czułość głowicy wynosi $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ A/hPa}$

Wyniki pomiarów obliczone z wykresu 3 dla próżni $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ hPa}$ ($2 \cdot 10^{-8} \text{ Tr}$) podano w tabeli 3.

Tabela 3

M [j.m.a.]	Prąd jonowy [A]
2 H_2^+	$1,1 \cdot 10^{-13}$
4 H_e^+	$0,3 \cdot 10^{-13}$
16 O^+	$1,3 \cdot 10^{-13}$
28 N_2^+	$2,2 \cdot 10^{-13}$
29 C_2H_5^+	$1,3 \cdot 10^{-13}$
$\Sigma 6,2 \cdot 10^{-13}$	



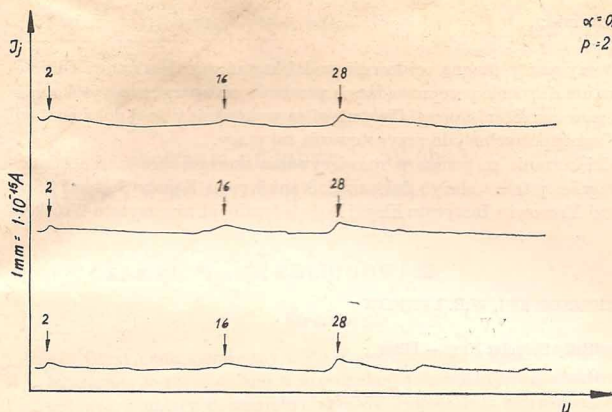
Wykres 3. Zapis widna mas w funkcji zmiany składowej stałej potencjału analizującego dla głowicy UFM z powielaczem elektronowym jako detektorem jonów; $p = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Tr}$.

Dla porównania przedstawiono na wykresie 4 zapis widna mas bez użycia powielacza elektronowego, dla tej samej wartości ciśnienia gazów resztkowych. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 4.

Tabela 4

M [j.m.a.]	Prąd jonowy [A]
2 H_2^+	$1,0 \cdot 10^{-15}$
16 O^+	$1,5 \cdot 10^{-15}$
28 N_2^+	$3,0 \cdot 10^{-15}$
	$\Sigma 5,5 \cdot 10^{-15}$

Czułość głowicy obliczona ze wzoru 7 wynosi $2 \cdot 10^{-7} \text{ A/hPa}$ ($2,7 \cdot 10^{-7} \text{ A/Tr}$)



Wykres 4 Zapis widma mas w funkcji zmiany składowej stałej potencjału analizującego dla klasycznej głowicy, $p = 2 \cdot 10^{-8} \text{Tr}$.

5. Dyskusja

Graniczna wartość ciśnień parcyjnych mierzonych przy pomocy klasycznego unipolarnego filtru mas, zależy w głównej mierze od jakości użytego elektrometru i starannego ekranowania całego toru pomiarowego prądu jonowego. W skład tego toru wchodzi również sama głowica pomiarowa UFM, której bardzo dokładne ekranowanie jest praktycznie niemożliwe. Powyższe czynniki powodują, że graniczna wartość mierzalnego w układzie prądu jonowego zawiera się między $5 \cdot 10^{-15}$ a 10^{-14}A , co przy czułości głowicy klasycznego UFM, wynoszącej dla bardzo niskich ciśnień $2,7 \cdot 10^{-7} \text{A/Tr}$, pozwala zanotować graniczne parcyjne ciśnienia gazów reszkowych wynoszące około $2 \cdot 10^{-8} \text{Tr}$. Przedstawiony w tej pracy UFM z wysokoczułym detektorem jonów pozwala zwiększyć czułość głowicy o około dwa rzędy wartości, co umożliwia analizę gazów reszkowych na poziomie $5 \cdot 10^{-11} \text{Tr}$.

Równocześnie, dzięki zmniejszeniu stałej czasowej toru rejestrującego, znaczenie wzrasta zdolność rozdzielcza UFM w zakresie mas atomowych 1–50, co widoczne jest na spektrogramach zamieszczonych na wykresach 1 i 2c. Dalszej poprawy czułości UFM można oczekiwać po zastosowaniu jako detektora — powielacza z ciągłą dynodą typu „Channeltron” z konwerterem jono-elektronowym na wejściu.

Podziękowanie:

Autorzy pracy pragną serdecznie podziękować mgr Marianowi Głowackiemu za umożliwienie przeprowadzenia pomiarów na aparaturze wysokopróżniowej, oraz mgr Stanisławowi Cichoniowi za wykonanie pełnej dokumentacji fotograficznej potrzebnej do przygotowania tej pracy.

Podziękowanie za pomoc w rozwiązywaniu szeregu zagadnień technicznych pragniemy także złożyć doktorowi Stanisławowi Kaszczyszynowi i doc. Stefanowi Mrozowi z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego.

W. K. MICHNOWSKI, W.E. LENKOW

High Sensitivity Unipolar Mass — Filter

Summary

Principle of operation of quadrupole mass filter (QFM) and its variation — unipolar mass filter (UFM) is described. A number of advantage (simplicity, compactness of construction, insensitivity to outside interferences, high resolution within a wide range of analysed masses) recommend the unipolar mass filter as a good device for analysing the vacuum systems.

The construction of UFM with an electron multiplier as a detector is described and the results of application of the device for analysing the residual gasses in high vacuum metal systems are given.

The filter sensitivity was 22 times higher at the pressure $2 \cdot 10^{-4}$ hPa ($1,5 \cdot 10^{-4}$ Tr) and 100 times higher at the pressure $2,7 \cdot 10^{-8}$ hPa ($2 \cdot 10^{-8}$ Tr) in comparison with a filter without multiplier.

Literatura

- [1] Fischer E., Z. Physik, **156**, 1, (1959).
- [2] Groszkowski J., Technika wysokiej próżni, WNT, W-wa (1972).
- [3] Kubiček P., Mrazek L., Československy Časopis pro Fysiku, **A 19**, 428, (1969).
- [4] Mróz S., Chrzanowski E., Zeszyty Naukowe, OBREP, **5**, 17, (1975).
- [5] Paul W., Raether M., Z. Physik, **140**, 262, (1955).
- [6] Paul W., Reinhard H.P. von Zahn U., Z. Physik, **152**, 143, (1958).
- [7] Paul W., Steinwedel H., Naturforsch, **8a**, 448, (1953).
- [8] Von Zahn U., Rev. Sci. Instr., **34**, 1, (1963).