

STABILIZACJA WYBRANYCH PARAMETRÓW STRUMIENIA TERMOELEKTRONÓW W GAZOWYCH ŹRÓDŁACH JONÓW

Dariusz Kuś, Jarosław Sikora

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Streszczenie: W pracy przedstawiono przegląd rozwiązań stosowanych w próżniomierzach jonizacyjnych i spektrometrach mas wykorzystujących strumień termoelektronów do jonizacji materii w postaci gazowej, w szczególności przykłady konstrukcji źródeł jonów oraz układów polaryzacji ich elektrod. Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy zaproponowano nowy sposób detekcji prądu termoeemisji elektronowej dla układów stabilizacji natężenia strumienia i energii elektronów.

Słowa kluczowe: próżnia, jonizacja, prąd termoeemisji elektronowej, energia elektronów, stabilizator, próżniomierz jonizacyjny, spektrometr mas

STABILIZATION OF SELECTED PARAMETERS ELECTRON BEAM ION SOURCES

Abstract: This paper presents an overview of the vacuum measurement instruments using electron – impact gas ion sources, especially examples of the ion sources and biasing systems. Based on the analysis results a new thermionic emission current detection method to implementation in stabilizer of ionizing beam intensity and electron energy has been proposed.

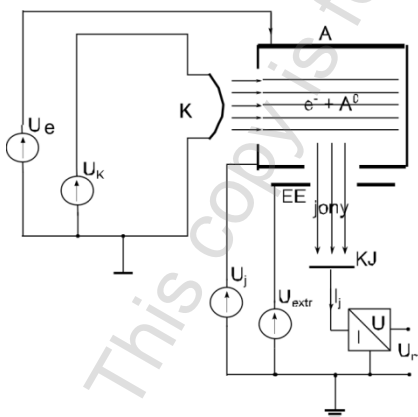
Keywords: vacuum, ionization, thermionic electron emission current, electron energy, stabilizer, ionization gauge, mass spectrometer

Wstęp

Wiele metod pomiarowych np. spektrometria mas oraz procesów technologicznych, zwłaszcza z obszaru nowych technologii, odbywa się w warunkach próżni. Stąd nieustanna konieczność doskonalenia metod wytwarzania i pomiarów próżni: wysokiej, ultrawysokiej oraz ekstremalnej, gdzie zastosowania pomiarowe znajdują próżniomierze jonizacyjne. Rozwój metod pomiarowych spektrometrii mas i jej zastosowań w badaniach podstawowych oraz w przemyśle wydobywczym, energetyce jądrowej, monitorowaniu i ochronie środowiska wymuszają prace nad poprawą parametrów gazowych źródeł jonów z gorącą katodą. Zarówno próżniomierz jonizacyjny jak i spektrometr mas wykorzystują do swego działania zjawisko jonizacji gazu za pomocą, między innymi, wiązki elektronów emitowanych z gorącej katody. Otrzymany w ten sposób prąd jonowy jest wykorzystywany do pomiaru ciśnienia w zakresie próżni od wysokiej do ekstremalnej (próżniomierze jonizacyjne) lub do analizy składu chemicznego i izotopowego próbek gazowych (spektrometry mas). W przyrządach tych, jonizacja jest pierwszym etapem procesu pomiarowego i stąd parametry źródła jonów mają podstawowe znaczenie dla dokładności i powtarzalności wyników pomiarów oraz czasu ich realizacji.

1. Głowice jonizacyjne

Głowica jonizacyjna pełniąca funkcję źródła jonów to podzespół aparatury pomiarowej, w którym zachodzi proces jonizacji gazu. Schemat źródła jonów wraz z układem polaryzacji elektrod jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat źródła jonów i układu polaryzacji [4]

Źródłem elektronów jest gorąca katoda (K), która na skutek przepływu prądu osiąga odpowiednio wysoką temperaturę i emituje swobodne elektrony. Dzięki różnicy potencjałów między katodą (K) i komorą jonizacyjną (A), elektrony pod wpływem napięcia przyspieszającego U_e uzyskują zadaną energię kinetyczną. Uformowana wiązka elektronów o natężeniu I_e , kierowana do komory jonizacyjnej o długości l , wypełnionej gazem o koncentracji n i całkowitym przekroju czynnym na jonizację Q_T , powoduje jonizację gazu, w wyniku której powstaje prąd jonowy o natężeniu określonym wzorem (1):

$$I_j = I_e Q_T (U_e) n l \quad (1)$$

Część powstałych jonów jest ekstrahowana z komory jonizacyjnej za pomocą pola elektrostatycznego wytworzonego między komorą jonizacyjną a elektrodą ekstrakcyjną (EE). Pod wpływem napięcia przyspieszającego U_j jony docierają do kolektora jonów KJ połączonego z przetwornikiem prąd-napięcie.

W przypadku spektrometru mas strumień jonów poruszający się między komorą jonizacyjną a kolektorem jonów dociera do obszaru sektorowego pola magnetycznego, które umożliwia selekcję jonów o wybranej wartości ilorazu m/q . Wartość natężenia prądu jonowego jest nośnikiem informacji o jakości mierzonej próżni w przypadku próżniomierza jonizacyjnego lub wartości ciśnienia parcyjnych w spektrometrze mas. Uzyskiwane natężenia prądu jonowego mają wartości pojedynczych pA, stąd najczęściej jest on konwertowany na napięcie U_m .

Wśród wielu rozwiązań głowic jonizacyjnych szczególnie interesujące są opisane poniżej.

Głowica z liniowym kolektorem jonów [1] posiada kolektor jonów wykonany z cienkiego drutu, który jest otoczony cylindryczną anodą wykonaną ze zwiniętego spiralnie drutu oraz katodę umieszczoną na zewnątrz cylindra.

Głowica z punktowym kolektorem jonów [8] składa się ze sferycznej anody wykonanej z siatki molibdenowej, wewnątrz której umieszczony jest punktowy kolektor jonów, zaś pierścieniowa katoda otacza anodę na zewnątrz.

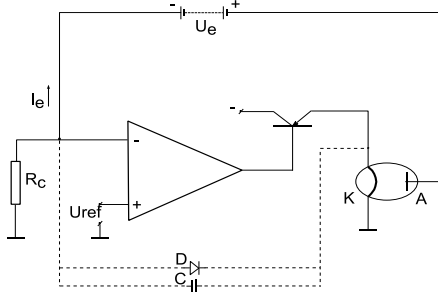
Zmniejszanie powierzchni kolektora w powyższych konstrukcjach spowodowało redukcję liczby fotoelektronów, generowanych pod wpływem miękkiego promieniowania rentgenowskiego emitowanego z obszaru anody, które stanowiło istotne źródło niedokładności w pomiarach próżni. Dalszą redukcję wpływu fotoemisji uzyskano w głowicy spektroskopowej Watanabe [9], dzięki umieszczeniu kolektora jonów poza obszarem jonizacji, czyli poza sferyczną, siatkową anodą. Wiązka jonów kierowana jest do kolektora za pomocą radialnego pola elektrycznego.

Zgodnie z zależnością (1), dla zapewnienia dokładności pomiarów koncentracji gazu n w badanym obszarze próżni, której

miarą jest natężenie prądu jonowego I_j , natężenie prądu termoemisji elektronowej I_e oraz napięcie przyspieszające elektrony U_e powinny być stabilizowane. Koncentracja gazu, dla ustalonej temperatury, jest z kolei miarą ciśnienia w badanym obszarze próżni.

2. Stabilizator prądu termoemisji elektronowej

Schemat przykładowego stabilizatora prądu termoemisji elektronowej jest przedstawiony na rys. 2.

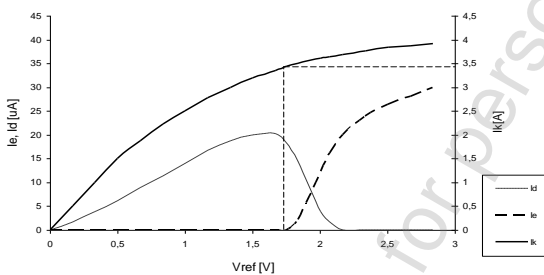


Rys. 2. Schemat stabilizatora z podwójną pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego [3]

Wzmacniacz operacyjny porównuje napięcie referencyjne U_{ref} z napięciem na rezystorze wzorcowym R_C , które jest wprost proporcjonalne do natężenia prądu emisji elektronowej I_e . Dzięki pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego składającej się z tranzystora, katody K, anody A, stabilizowanego źródła napięcia przyspieszającego U_e , rezystora referencyjnego R_C , prąd emisji elektronowej I_e jest stabilizowany i jego natężenie można zapisać jak poniżej [3]:

$$I_e = \frac{U_{ref}}{R_C} \quad (2)$$

Dodatkowy obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego składa się z diody D oraz kondensatora C. Kiedy temperatura katody K jest zbyt niska, prąd emisji elektronowej I_e jest zerowy, dioda D jest w stanie przewodzenia i w konsekwencji napięcie katody jest stabilizowane. Poprzez zwiększanie napięcia U_{ref} można uzyskać stopniowy wzrost temperatury katody. Zależności między natężeniami prądu termoemisji elektronowej I_e , prądu katody I_K oraz prądu diody I_D w funkcji napięcia referencyjnego U_{ref} pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność natężeń prądu emisji, katody i diody w funkcji napięcia referencyjnego [3]

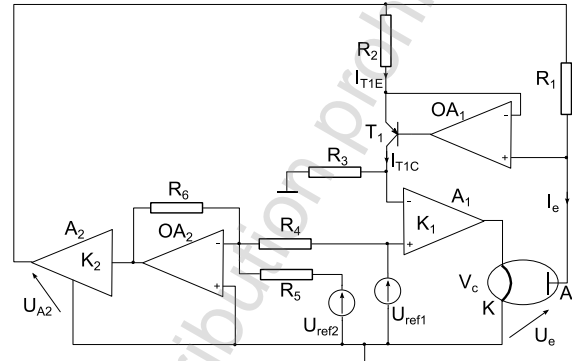
Układ zapewnia stopniowe rozgrzewanie katody, co sprzyja wydłużeniu czasu jej żywotności oraz zabezpiecza katodę przed spalaniem, w sytuacji przypadkowego rozwarcia zewnętrznych połączeń między zaciskami źródła jonów i stabilizatorem. Powyższe zalety są cenne, ponieważ wymiana katody jest bardzo czasochłonna, wymaga zapowietrzenia komory źródła jonów, a po jej wymianie proces uzyskiwania wysokiej próżni przebiega bardzo wolno.

W przedstawionym rozwiązaniu układowym, detekcja prądu termoemisji jako sygnału ujemnego sprzężenia zwrotnego jest realizowana w obwodzie anodowym. W konsekwencji połączenie galwaniczne wysokonapięciowego obwodu anodowego z niskonapięciowym obwodem katodowym, sterującym grzaniem

katody, ogranicza zakres wysokich napięć anodowych do wartości napięć dopuszczalnych dla elementów tworzących obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego.

3. Stabilizator prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony

Schemat stabilizatora natężenia prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stabilizatora napięcia przyspieszającego i prądu emisji elektronowej [6]

Stabilizator prądu termoemisji elektronowej zbudowany jest w oparciu o wzmacniacz A_1 , który objęty jest obwodem ujemnego sprzężenia zwrotnego, zawierającym rezystor R_3 , źródło prądowe sterowane prądowo (R_1 , OA_1 , R_2 , T_1), anodę i katodę. Zakładając, że wzmacniacz operacyjny OA_1 jest idealny [2], wartość jego wzmocnienia dąży do nieskończoności, co implikuje wirtualne zwarcie pomiędzy wejściami (+), (-) i w konsekwencji można zapisać, iż spadek napięcia na rezystorze R_1 jest równy spadkowi napięcia na rezystorze R_2 :

$$I_{T1E} R_2 = I_e R_1 \quad (3)$$

Dla tranzystora T_1 :

$$I_{T1C} = \frac{I_{T1E}}{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4a)$$

gdzie: I_{T1C} – natężenie prądu kolektora, I_{T1E} – natężenie prądu emitera, β – współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora T_1 .

Zakładając w naszym przypadku, że $\beta \gg 1$, równanie (4a) można aproksymować jak poniżej:

$$I_{T1C} = I_{T1E} \quad (4b)$$

Podstawiając wyrażenie (4b) do równania (3) oraz zakładając, że:

$$R_1 = R_2 \quad (5)$$

otrzymuje się:

$$I_{T1C} = I_e \quad (6)$$

Wzmacniacz A_1 porównuje wartość napięcia referencyjnego U_{ref1} ze spadkiem napięcia na rezystancji R_3 i w oparciu o sygnał błędny steruje grzaniem katody, tak aby zapewnić stałe natężenie prądu termoemisji elektronowej, które można zapisać następująco:

$$I_e = \frac{U_{ref1}}{R_3} \quad (7)$$

Zakładając ponadto [6], że:

$$R_1 = R_3 = R_5 = R_6 \quad (8)$$

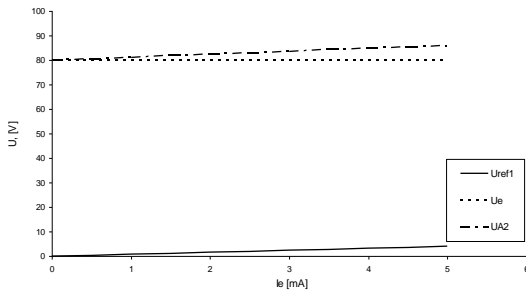
oraz

$$K_2 = -\frac{R_4}{R_6} \quad (9)$$

wartość napięcia U_e przyspieszającego elektrony jest określona poniższym wyrażeniem:

$$U_e = -K_2 U_{ref2} \quad (10)$$

Na rysunku 5 przedstawiono zależności napięcia U_{A2} , napięcia referencyjnego U_{ref1} oraz napięcia przyspieszającego U_e w funkcji natężenia prądu termoemisji elektronowej I_e .



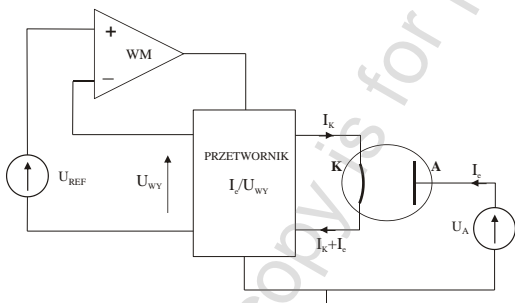
Rys. 5. Zależność napięcia przyspieszającego U_e , napięcia referencyjnego U_{ref1} oraz napięcia U_{A2} w funkcji natężenia prądu termoemisji elektronowej I_e .

Wraz ze wzrostem prądu emisji I_e również rośnie napięcie U_{A2} , dzięki temu napięcie przyspieszające U_e jest stałe. Różnica napięć $U_{A2} - U_e$ jest równa napięciu referencyjnemu U_{ref1} niezależnie od wartości prądu I_e .

W powyższym rozwiązaniu detekcja prądu termoemisji elektronowej jest realizowana również w obwodzie anodowym, co utrudnia uzyskanie wysokich energii elektronów.

4. Stabilizator z detekcją prądu termoemisji elektronowej w obwodzie katody

W przedstawionych stabilizatorach, detekcja prądu termoemisji elektronowej jako sygnału ujemnego sprzężenia zwrotnego jest realizowana w obwodzie anodowym. W konsekwencji połączenie galwaniczne wysokonapięciowego obwodu anodowego z niskonapięciowym obwodem katodowym, sterującym grzaniem katody, ogranicza zakres wysokich napięć anodowych do wartości napięć dopuszczalnych dla elementów tworzących obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego. W celu zwiększenia zakresu wysokich napięć anodowych, dla uzyskania wysokoenergetycznych wiązek elektronowych, w układzie stabilizacji prądu termoemisji elektronowej detekcja prądu termoemisji elektronowej powinna być realizowana w obwodzie katody. Wprowadzić byłyby podejmowane próby w tym zakresie [7], ale nie uwzględniają one potrzeby stabilizacji energii elektronów. Na rysunku 6 jest przedstawiony schemat proponowanego układu stabilizacji z wykorzystaniem przetwornika prąd termoemisji-napięcie w obwodzie katody.



Rys. 6. Schemat proponowanego układu stabilizacji z wykorzystaniem przetwornika prąd termoemisji-napięcie w obwodzie katody

Detekcja prądu termoemisji elektronowej w obwodzie katody, dla potrzeb stabilizacji parametrów strumienia termoelektronów [5], jest zagadnieniem nowym, w świetle przeglądu dostępnej literatury światowej. O jej przydatności, zadecyduje autorski przetwornik prąd termoemisji-napięcie oraz jakość jego parametrów, w szczególności liniowość charakterystyki statycznej,

czułość, a także właściwości dynamiczne opisane charakterystyką częstotliwościową transkonduktancji. Zagadnienie jest złożone, ponieważ natężenie prądu termoemisji elektronowej zależy zarówno od temperatury katody, ale również, od zróżnicowanej pracy wyjścia elektronów na powierzchni katody, na skutek szeregu zjawisk fizyko-chemicznych między innymi utleniania, desorpcji. W rezultacie, detekcja prądu termoemisji elektronowej w całkowitym prądzie katody, większym o kilka rzędów wielkości, wymaga zastosowania przetwarzania w czasie rzeczywistym dwóch sygnałów pomiarowych w dziedzinie częstotliwości oraz korekcji w funkcji temperatury. Po doświadczalnej weryfikacji nowej metody detekcji, kolejnym etapem będzie opracowanie kontrolera prądu termoemisji elektronowej wykorzystującego proponowaną metodę.

5. Wnioski

W dotychczas znanych i stosowanych układach stabilizacji parametrów strumienia termoelektronów detekcja natężenia prądu termoemisji elektronowej jest realizowana w obwodzie anodowym. Utrudnia to uzyskiwanie monoenergetycznego strumienia elektronów o wysokich energiach. Są wprawdzie próby wykorzystania, w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego, układów z izolacją galwaniczną, ale stosowanie ich wprowadza dodatkowe zniekształcenia nieliniowe oraz wpływa niekorzystnie na poziom szumów sygnału wyjściowego stabilizatora. Zaproponowana metoda detekcji natężenia strumienia elektronów umożliwia eliminację gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego łączącej wysokonapięciowy obwód anodowy z niskonapięciowym obwodem katodowym i w rezultacie daje perspektywę do uzyskania znacząco wyższych, stabilizowanych energii elektronów.

Literatura

- [1] Bayard R. T., Alpert D.: *Extension of the low pressure range of the ionization gauge*, Rev. Sci. Instrum., 21, 1950, pp. 571-572.
- [2] Gołde W., Śliwa L.: *Wzmocniacze operacyjne i ich zastosowania, cz. 1, Podstawy teoretyczne*, WNT, Warszawa 1982.
- [3] Hałas S., Sikora J.: *Electron emission stabiliser with double negative feedback loop*. Meas. Sci. Technol. 1, 1990, pp. 980-982.
- [4] Sikora J.: *Dekorelacja natężenia wiązki jonizującej i energii elektronów w źródłach jonów z gorącą katodą*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2004.
- [5] Sikora J.: *Układ stabilizacji prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony zwłaszcza dla wysokich energii elektronów*, Zgłoszenie patentowe P.398424, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2012.
- [6] Sikora J.: *Dual application of a biasing system to an electron source with a hot cathode*. Meas. Sci. Technol. 15, 2004, N10-N14.
- [7] Sikora J., Szczepaniak L.: *Układ stabilizacji prądu termoemisji elektronowej zwłaszcza dla wysokich energii elektronów*, Patent Nr 210947, Warszawa 2011.
- [8] Watanabe F.: *Point collector ionization gauge with spherical grid for measuring pressures below 10-11 Pa*, J. Vac. Sci. Technol., A, 5, 2, 1987, pp. 242-248.
- [9] Watanabe F.: *Ion spectroscopy gauge: Total pressure measurements down to 10-12 Pa with discrimination against electron-stimulated-desorption ions*, J. Vac. Sci. Technol., A, 10, 1992, pp. 3333-3339.

Mgr inż. Dariusz Kuś
e-mail: d.kus@pollub.pl

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej na kierunku Elektrotechnika. W 2011 rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrycznym i Informatyki Politechniki Lubelskiej na kierunku Elektrotechnika.



Dr hab. inż. Jarosław Sikora, prof. PL
e-mail: jaroslaw.sikora@pollub.pl

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej i Wydziału Mat.-Fiz.-Chem. UMCS. W Politechnice Lubelskiej uzyskał stopień doktora nauk technicznych oraz stopień doktora habilitowanego w zakresie dyscypliny naukowej elektrotechnika. Prace naukowo-badawcze prowadzone w Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej dotyczą między innymi implementacji metod przetwarzania sygnałów pomiarowych w układach regulacji, przeznaczonych dla próżniowych przyrządów pomiarowych, w szczególności spektrometrów mas i próżniomierzy jonizacyjnych.

