

H. MURLAK-STACHURA, M. PIŁAT

## Wpływ warstwy przysondowej na proces ekstrakcji jonów

### WPROWADZENIE

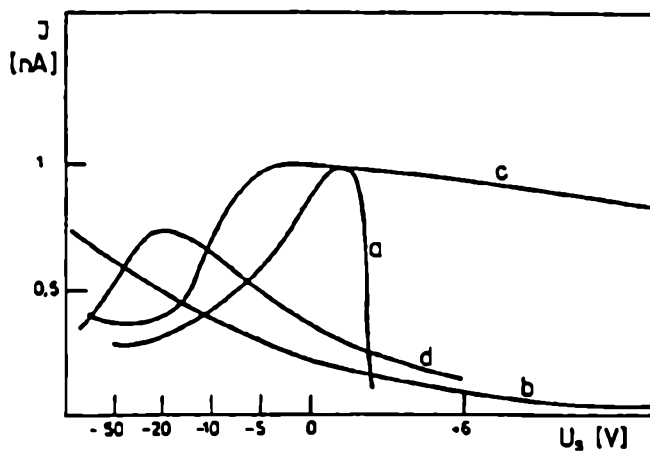
Problematyka ekstrakcji jonów pojawia się w eksperymentalnych badaniach plazmy, w których obiektem głównego zainteresowania są procesy zachodzące w plazmie, jak również w badaniach reakcji jonowo-cząsteczkowych [1,2]. Mówiąc ogólnie, występuje ona we wszystkich tych przypadkach gdzie plazma jest źródłem jonów.

Jeżeli uda się przeprowadzić proces ekstrakcji jonów bez wywierania wpływu na rzeczywiste stosunki plazmy, to dalsza detekcja jonów może odbywać się za pomocą konwencjonalnych metod. Można wtedy wyciągnąć wnioski odnośnie koncentracji jonów w plazmie ze zmierzonych wartości prądów jonowych.

W przypadku, kiedy ekstrakcję jonów przeprowadza się za pomocą sondy z otworem, umieszczonej na ściance rury do wyładowań [4,7] następuje zaburzenie plazmy spowodowane wprowadzeniem dodatkowej elektrody. Elektroda z otworem umieszczona na ściance rury do wyładowań zachowuje się tak jak sonda Langmuira. Tworzy się przed nią warstwa ładunku przestrzennego, określona w literaturze jako warstwa przysondowa. Natężenie pola elektrycznego w warstwie i jej grubość stają się większe wraz ze wzrostem napięcia sondy. Głębokość wnikania pola elektrycznego w plazmę związana jest z promieniem Debye'a  $\lambda_D$ . Bardzo często grubość warstwy przysondowej utożsamia się z wielkością  $\lambda_D$ . W rzeczywistości, pole elektryczne sondy wnika głęboko w plazmę poza granice warstwy. W pobliżu silnie ujemnej sondy koncentracja elektronów jest mała w porównaniu z koncentracją jonów. Między quasineutralnym obszarem i strefą ładunku przestrzennego znajduje się obszar przejściowy. Warstwa quasineutralna nosi nazwę przedwarstwy. W obszarze tym zachodzi spadek potencjału  $\Delta U \approx kT_e$ . Mimo quasineutralności, koncentracja ładunków obu znaków jest w przedwarstwie inna niż w plazmie niezaburzonej. Umieszczenie sondy na ściance rury pociąga za sobą następne problemy. Koncentracja jonów przy ściance jest inna niż na osi rury jako skutek dyfuzji ambipolarnej do ścianek

i procesów rekombinacji. Jony przechodzą przez warstwę, która zmienia ich gęstość i energię. Rozkład prędkości jonów w pobliżu ścianki rury różni się znacznie od rozkładu wewnątrz plazmy, ponieważ prędkości jonów zmieniają się w quasineutralnej strefie, jak też w obszarze ładunku przestrzennego. Nieelastyczne zderzenia pomiędzy jonami przyspieszonymi w warstwie przysondowej i neutralnymi cząsteczkami gazu mogą dawać nowe rodzaje jonów. W przypadku, gdy  $\lambda_i \gg \lambda_D$ , obszar plazmy leżący w odległości  $\lambda_i$  od sondy ekstrakcyjnej nie jest zaburzony. Tylko wtedy wyciągane jony będą reprezentatywne dla badanej plazmy. Natomiast w przypadku, gdy  $\lambda_i \ll \lambda_D$ , w warstwie przysondowej mogą zdarzyć się zderzenia i obecność sondy zakłóca procesy zachodzące w plazmie.

Określenie wpływu warstwy przysondowej na proces próbkowania jest możliwe poprzez badanie jej skutków działania na prąd wyciąganych jonów. Zmiana potencjału sondy ekstrakcyjnej pociąga za sobą zmianę grubości warstwy przysondowej, przy stałym ciśnieniu gazu  $p$  i natężeniu prądu wyładowania  $I_d$ . A więc pomiary natężenia prądu wyciąganych jonów, które (przy  $p = \text{const}$ ,  $I_d = \text{const}$ ) zawierają napięcie polaryzacji sondy jako zmienną, mogą dostarczyć informacji o skutkach działania warstwy przysondowej.



Ryc. 1. Natężenie prądu wyciąganych jonów w funkcji napięcia polaryzacji sondy otrzymane przez następujących autorów: a) Brömer, Hesse [4], b) Nowak, Waidmann [7], c) Heinrich, Müller [6], d) Murlak, Stachórska, Wroński [9]

Jak wykazały wcześniejsze prace, natężenie prądu wyciąganych jonów zależy od napięcia polaryzacji sondy ekstrakcyjnej. Rycina 1 przedstawia krzywe natężenia prądu jonów w funkcji napięcia polaryzacji sondy otrzymane przez różnych autorów. Brömer i Hesse [4] przeprowadzili pomiary w azocie przy ciśnieniu kilku Torr. W tych warunkach wyładowania gdy  $\lambda_i \ll \lambda_D$ , w warstwie przysondowej zachodziły zderzenia. Na krzywej zależności  $I$  od  $U_s$  obserwuje się maksimum (krzywa a na ryc. 1). Znajduje się ono po stronie dodatnich napięć polaryzacji sondy (liczonych względem potencjału pływania  $U_s = 0$ ). Późniejsza praca Lergona i Müllera

[5] podaje podobny kształt zależności dla jonów wyciąganych z plazmy wyładowania w Ar kiedy  $\lambda_i \approx \lambda_D$ . Maksimum krzywej położone jest po stronie ujemnych napięć polaryzacji sondy. Jak wykazano w pracy [9] położenie tego maksimum zależy od ciśnienia. Wzrost ciśnienia powoduje jego przesunięcie w stronę dodatnich napięć polaryzacji sondy. Natomiast wysokość maksimum rośnie przy zwiększaniu natężenia prądu wyładowania.

Otrzymał przez Henricha i Müllera [6] zależność natężenia prądu jonów od napięcia polaryzacji sondy przedstawia krzywa *c* na ryc. 1. Autorzy podają, że pomiary wykonano w Ar dla  $2 > \frac{\lambda_i}{\lambda_D} > 1$ .

Nowak i Waidmann [7] otrzymali jeszcze inny charakter tej zależności [ $I = f(U_S)$ ] niż pozostali autorzy (krzywa *b* na ryc. 1). Przedstawiona rozbieżność wyników uzyskiwanych przez różnych autorów wskazuje, że problem ten nadal nie jest wyjaśniony.

Celem pracy było określenie wpływu warstwy przysondowej na proces próbkowania jonów, poprzez badanie skutków działania tej warstwy na natężenie prądu jonów wyciąganych. Grubość warstwy przysondowej zmieniano poprzez zmianę napięcia polaryzacji sondy ekstrakcyjnej  $U_S$  (przy stałym ciśnieniu gazu  $p$  i natężeniu prądu wyładowania  $I_d$ ). Badano jony wyciągane z kolumny dodatniej wyładowania jarzeniowego w azocie.

#### WYNIKI POMIARÓW

Schemat i opis układu pomiarowego zawiera praca [12]. Promień rury wynosił 27,5 mm, promień sondy ekstrakcyjnej  $r_S = 0,5$  mm, promień otworu w sondzie  $r = 0,1$  mm, grubość sondy  $d = 0,04$  mm. Obiektem badań była kolumna dodatnia wyładowania jarzeniowego w azocie dla ciśnień  $p = (5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1})$  Tr i natężenia prądu wyładowania  $I_d = (5 - 40)$  mA. W badanym przedziale  $p$  i  $I_d$  średnia droga swobodna jonów  $\lambda_i = (0,3 - 0,8)$  mm i we wszystkich przypadkach  $\lambda_i < \lambda_D$ .

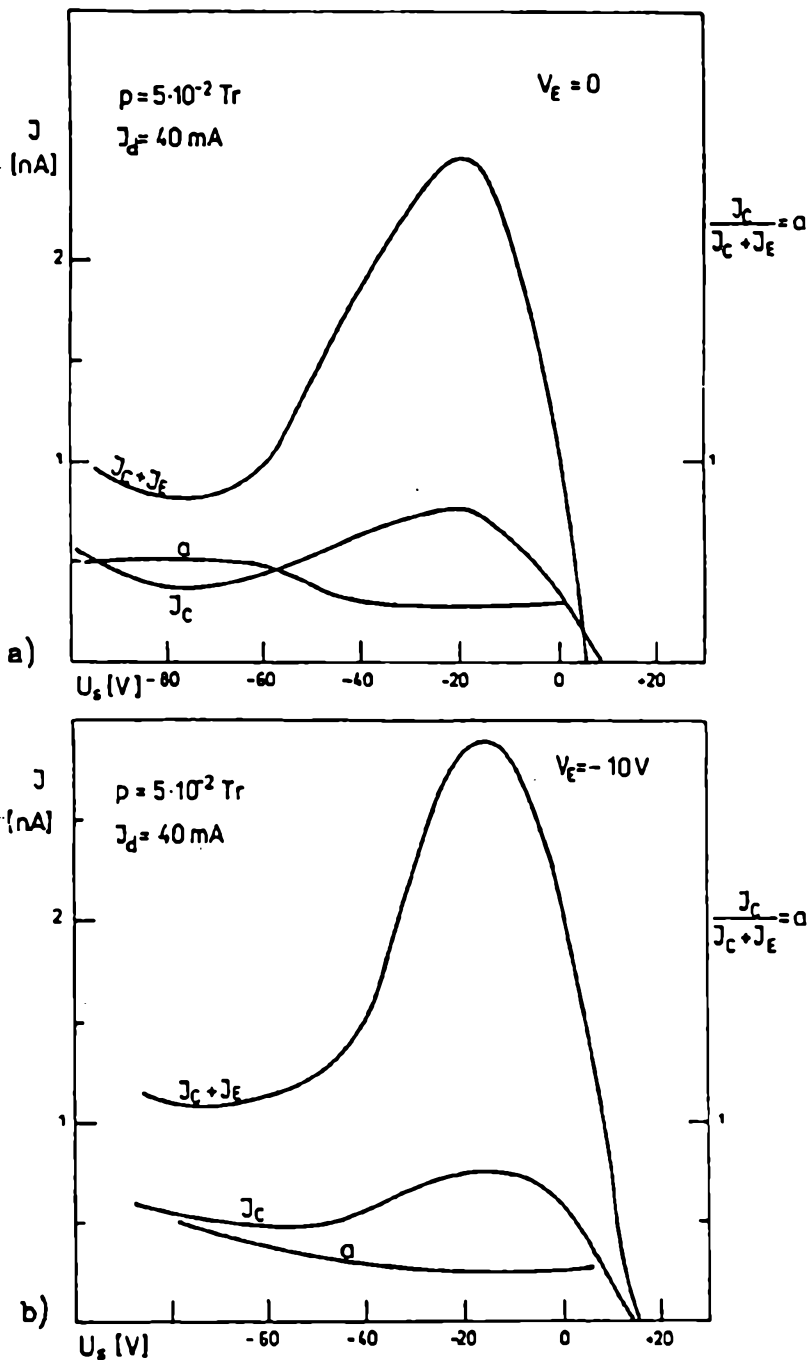
Przy ustalonym ciśnieniu gazu  $p$  i natężeniu prądu wyładowania  $I_d$  a różnych potencjałach polaryzacji sondy ekstrakcyjnej  $U_S$  mierzono:

— natężenie prądu jonów przechodzących przez otwór w sondzie ekstrakcyjnej ( $I_C + I_E$ ),

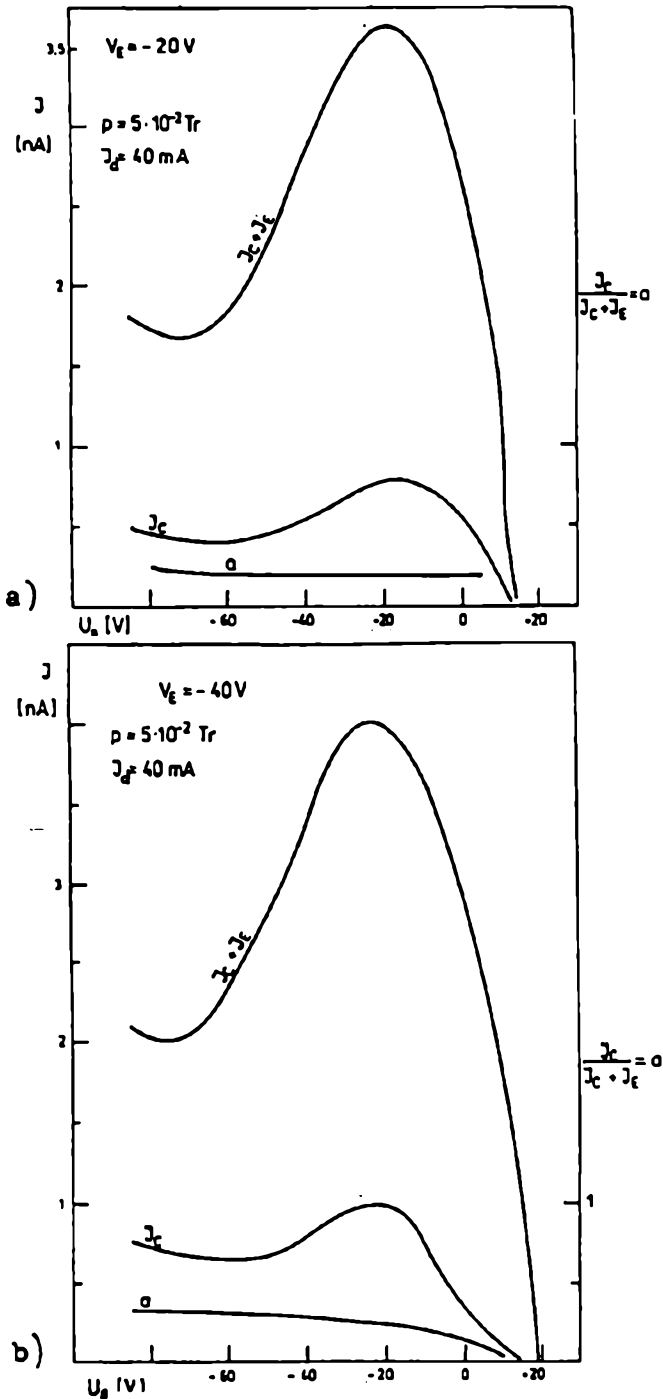
— natężenie prądu jonów dochodzących do kolektora  $I_C$ .

Pomiary te wykonano dla różnych potencjałów elektrody przyspieszającej  $V_E$ . Analizę energetyczną jonów dochodzących do kolektora przeprowadzono metodą siatek hamujących [8]. We wszystkich przedstawionych wynikach potencjał sondy ekstrakcyjnej został odniesiony do potencjału pływania.  $U_S = 0$  odpowiada sytuacji, kiedy całkowity prąd płynący do sondy ekstrakcyjnej wynosi zero.

Pomiary wykazały, że natężenie prądu jonów wyciąganych zależy od napięcia polaryzacji sondy. Typową zależność  $I = f(U_S)$  dla stałego ciśnienia gazu  $p$  i natężenia prądu wyładowania przedstawia krzywa *d* na ryc. 1. Przy określonej wartości napięcia  $U_S$  występuje maksimum prądu. Przy tych samych wartościach  $p$  i  $I_d$  zmierzono również natężenie prądu jonów dochodzących do elektrody przyspieszającej. Na wykresach (Ryc. 2, 3) przedstawiono prąd kolektora  $I_C$  oraz natężenie prądu



Ryc. 2a,b. Natężenie prądu kolektora  $J_c$  oraz prądu jonów przechodzących przez otwór w sondzie ekstrakcyjnej ( $J_c + J_E$ ) w zależności od napięcia polaryzacji sondy, dla różnych potencjałów elektrody przyspieszającej  $V_E$

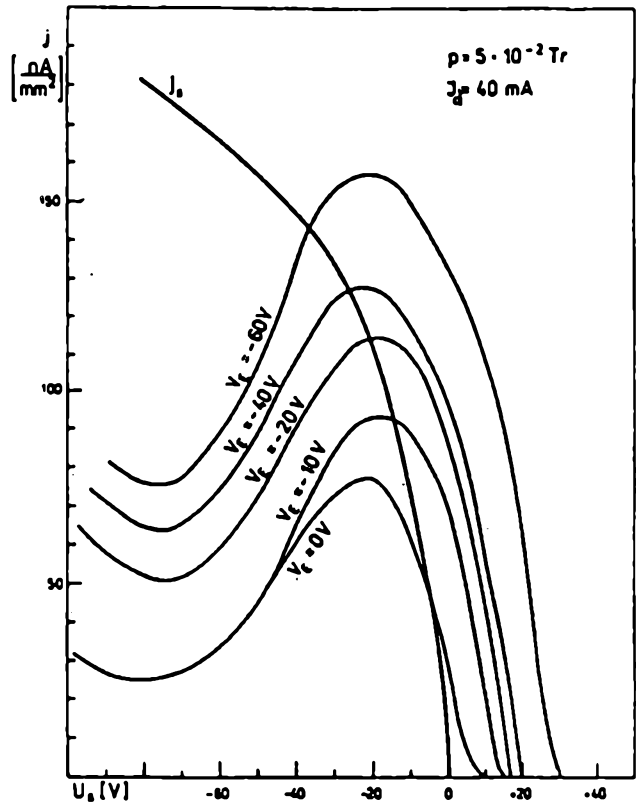


Ryc. 3a,b. Natężenie prądu kolektora  $I_C$  oraz prądu jonów przechodzących przez otwór w sondzie ekstrakcyjnej ( $I_C + I_E$ ) w zależności od napięcia polaryzacji sondy, dla różnych potencjałów elektrody przyspieszającej  $V_E$

jonów przechodzących przez otwór w sondzie ( $I_C + I_E$ ) w funkcji  $U_S$ . Współczynnik  $a$  określa zmianę  $\frac{I_C}{I_C + I_E}$  w zależności od napięcia polaryzacji sondy  $U_S$ .

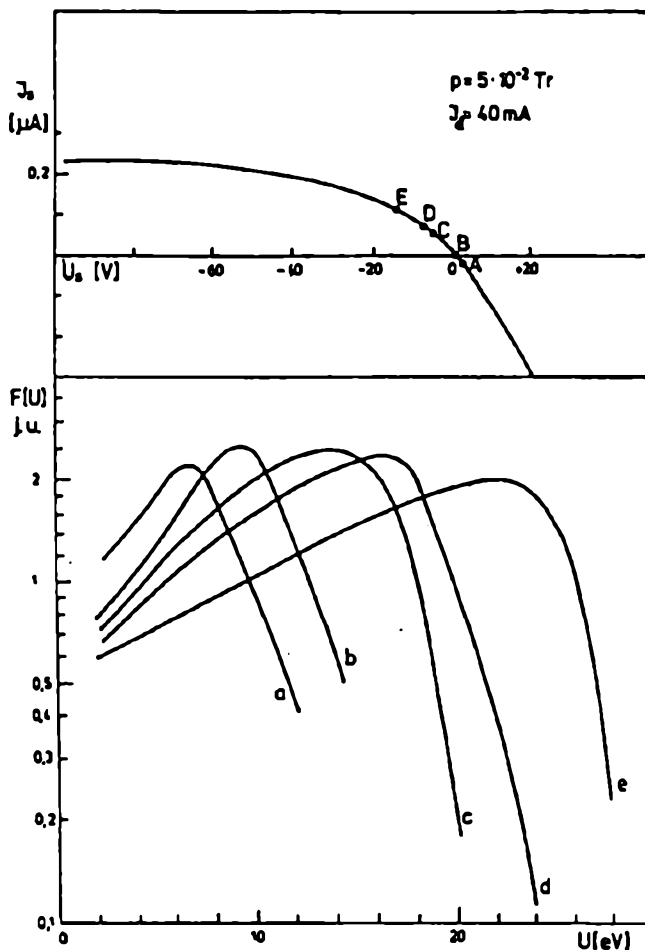
Uzyskane wyniki wskazują, że prąd rejestrowany przez kolektor stanowi od 5% do około 50% prądu jonów przechodzących przez otwór w sondzie. Wartość współczynnika  $a$  zależy od potencjału elektrody przyspieszającej. Dla ustalonego  $V_E$  stosunek  $\frac{I_C}{I_C + I_E}$  zależy od napięcia polaryzacji sondy. Jednakże przy  $V_E = -20$  V współczynnik  $a$  ma prawie stałą wartość w całym zakresie zmian  $U_S$ .

Na ryc. 4 przedstawiono gęstości prądu sondy ekstrakcyjnej  $j_s$  oraz gęstość  $j$  prądu przechodzącego przez jej otwór w funkcji napięcia polaryzacji  $U_S$ . Krzywe wyznaczono dla różnych potencjałów elektrody przyspieszającej. Dla ustalonej wartości  $V_E$  istnieje określona wartość napięcia polaryzacji sondy, przy której gęstości obu prądów są jednakowe. Dla  $V_E = -20$  V równość ta występuje dla wartości  $U_S$  odpowiadającej maksimum gęstości prądu przechodzącego przez otwór w sondzie.



Ryc. 4. Gęstość prądu sondy ekstrakcyjnej  $j_s$  oraz gęstość prądu jonów przechodzących przez otwór w sondzie w funkcji napięcia polaryzacji sondy, dla różnych potencjałów elektrody przyspieszającej

Otrzymane dla tych samych wartości ciśnienia i natężenia prądu wyładowania rozkłady energetyczne jonów pokazano na ryc. 5. Na tym samym rysunku przedstawiono charakterystykę sondy ekstrakcyjnej. Punkty A, B, C, D, E określają napięcie

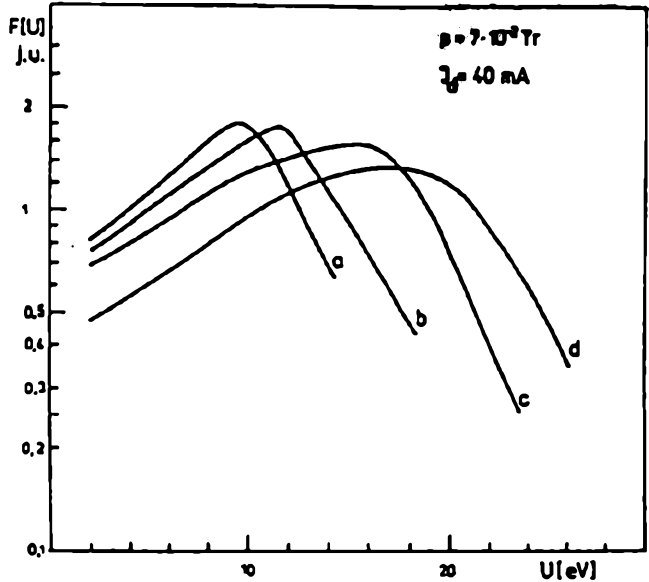


Ryc. 5. Charakterystyka sondy ekstrakcyjnej oraz funkcje rozkładu jonów dla różnych napięć polaryzacji sondy. a)  $U_s = +2$  V, b)  $U_s = 0$  V, c)  $U_s = -5$  V, d)  $U_s = -7$  V, e)  $U_s = -14$  V

polaryzacji sondy, dla których wyznaczono rozkłady energetyczne jonów (krzywa *a*, *b*, *c*, *d*, *e*). Rycina 6 pokazuje rozkłady energetyczne jonów wyznaczone dla takich samych napięć polaryzacji sondy, jak krzywe na ryc. 5, a większej wartości ciśnienia gazu. We wszystkich przypadkach na krzywych rozkładu obserwuje się maksimum. Zmiana napięcia polaryzacji sondy powoduje przesunięcie widma energetycznego wzdłuż skali energii. Zmienia się również kształt krzywej rozkładu. Kształt funkcji rozkładu oraz ich położenie na osi energii zależy również od ciśnienia (Ryc. 5, 6).

#### PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki pozwalają wyciągnąć wnioski o zakłóceniu próbkowania jonów spowodowanym warstwą ładunku przestrzennego, tworzącą się przed sondą ekstrakcyjną. Grubość tej warstwy można zmieniać poprzez zmianę napięcia polaryzacji sondy. Natężenie pola elektrycznego w warstwie przysondowej i jej grubość stają



Ryc. 6. Funkcje rozkładu jonów dla różnych napięć polaryzacji sondy ekstrakcyjnej. a)  $U_S = +2$  V, b)  $U_S = 0$  V, c)  $U_S = -5$  V, d)  $U_S = -7$  V

się tym większe im większe jest ujemne napięcie polaryzacji sondy. Wzrost napięcia pociąga za sobą zmiany natężenia prądu wyciąganych jonów (Ryc. 1, krzywa d). Zmiany potencjału elektrody przyspieszającej mają wpływ na prąd ekstrakcyjny, jednakże nie zmieniają charakteru zależności  $I_C = f(U_S)$  (Ryc. 2, 3).

Wiązka jonów wchodzących do otworu w sondzie ekstrakcyjnej jest rozbieżna. Prąd rejestrowany przez kolektor stanowi od około 5% do 50% prądu przechodzącego przez otwór. Wartość współczynnika  $a = \frac{I_C}{I_C + I_E}$  zależy od potencjału elektrody przyspieszającej. Optymalnym potencjałem okazuje się wartość  $(-20$  V). Dla tej wartości ( $V_E$ ) współczynnik  $a$  prawie nie zmienia się przy zmianie napięcia polaryzacji ( $U_S$ ). Przy tej wartości potencjału elektrody przyspieszającej gęstości prądu sondy ekstrakcyjnej i prądu jonów przechodzących przez otwór są jednakowe przy wartości napięcia ( $U_S$ ), dla której występuje maksimum krzywej  $I = f(U_S)$ .

Stwierdzono również, że zmiana napięcia polaryzacji sondy zmienia kształt funkcji rozkładu, a także przedział energii wyciąganych jonów. Przedział energii wyciąganych jonów zależy również od ciśnienia gazu.

Otrzymane wyniki wskazują, że w warstwie przysondowej zachodzą zderzenia, które zmieniają formę rozkładu i energię jonów. Wzrost napięcia polaryzacji sondy powoduje zwiększenie grubości warstwy przysondowej, a tym samym rośnie prawdopodobieństwo zderzeń i generacji nowych jonów w warstwie. Natomiast wzrost ciśnienia pociąga za sobą skrócenie średniej drogi swobodnej jonów ( $\lambda_i \sim \frac{1}{p}$ ), co może być również przyczyną zderzeń w warstwie.

Przedstawione rezultaty wskazują, że jony wyciągane za pomocą sondy umieszczonej na ściance rury, z powodu przyspieszenia w warstwie ładunku przestrzennego i występowania zderzeń, nie są reprezentatywne. Ze zmierzonych prądów jonowych nie można wyciągać wniosków odnośnie do koncentracji i rodzaju jonów w obję-



tości plazmy. Całkowite wyeliminowanie wpływu warstwy przysondowej na proces próbkowania jest możliwe tylko wtedy, kiedy sonda będzie na potencjale plazmy (nie ma warstwy przysondowej). Jednakże w tym przypadku prądy jonowe są znikomo małe i wymagana jest wysoka czułość aparatury. Pojawiają się duże trudności eksperymentalne. Aby więc zminimalizować skutki działania warstwy należałoby polaryzować sondę dodatnim potencjałem (względem potencjału plywania).

Z drugiej strony wydaje się możliwe ograniczenie wpływu warstwy przysondowej poprzez zachowanie warunku  $\lambda_i > \lambda_D$ , jeżeli przyjmiemy  $\lambda_D$  za miarę grubości warstwy. W niektórych pracach [5] spełnienie tego warunku przyjmowane jest do określania warstwy przysondowej jako bezzderzeniowej.

#### LITERATURA

- [1] Pahl M., *Z. Naturforsch.*, 12a (1957), 632.
- [2] Pahl M., Weimar U., *Z. Naturforsch.*, 13a (1958), 745.
- [3] Knewstubb P. E., Tickner A. W., *J. Chem. Phys.*, 36 (1962), 674, 684.
- [4] Brömer H. H., Hesse J., *Z. Naturforsch.*, 23a (1968), 1960.
- [5] Lergon H. G., Müller K. G., *Z. Naturforsch.*, 32a (1977), 1093.
- [6] Henrich K., Müller K. G., *Z. Naturforsch.*, 29a (1974), 1276.
- [7] Nowak M., Waidmann G., *Z. angew. Physik*, 31 (1971), 300.
- [8] Wroński Z., Pilat M., *Vacuum*, 38 (1988), 547.
- [9] Murlak-Stachura H., Stachórska D., Wroński Z., *Ann. UMCS, sect. AAA*, (1984), 2.
- [10] Hasted J. B., *Int. J. Mass Spectr. Ion Phys.*, 16 (1975), 3.
- [11] Ferguson E. E., *Advances in Electronics and Electron Physics*, 18, Academic Press, New York 1968.
- [12] Murlak-Stachura H., Pilat M., *Ann. UMCS, sect. AAA*, (1988/1989) .

