

Dr inż. Mirosław Maziejuk

Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii

ul. al. gen. A. Chruściela „Montera” 105

00-910 Warszawa

ZAŁĄCZNIK 2A

AUTOREFERAT

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Warszawa, grudzień 2016 r.

1. Imię i nazwisko

Mirosław Maziejuk

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Dyplom doktora nauk technicznych w dyscyplinie: elektronika, specjalność - metrologia, Wydział Elektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, 1995 r.
Tytuł rozprawy: Cyfrowa sonda do pomiaru mocy wybuchów jądrowych z programowanym imitatorem impulsu świetlnego.
Promotor: dr hab. inż. Józef Pawelec
- Dyplom magistra inżyniera chemii o specjalności elektroniczny sprzęt wojsk chemicznych, Wydział Chemii i Fizyki Technicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, 1981 r.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo badawczych

od 2010 - obecnie	Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii - Zastępca Kierownika Zakładu Radiometrii i Maskowania/adiunkt
2004-2008	Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki – konstruktor/specjalista elektronik
2001-2006	Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii - adiunkt
1983-1996	Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii-asystent

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.)**4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:**

Badania nad procesami identyfikacji substancji chemicznych za pomocą różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów oraz zastosowanie spektrometrii ruchliwości jonów do wykrywania skażeń chemicznych

4.2. Wykaz publikacji naukowych stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego:

- [H1] M. Maziejuk, W. Harmata
Spektrometr ruchliwości jonów jako element układów do wykrywania wysokotoksycznych substancji chemicznych
Przemysł Chemiczny, 2006, 85, 11, 1495-1499

IF = 0,429

- [H2] M. Ceremuga, **M. Maziejuk**, M. Szyposzyńska, Sz. Szmidt
Identyfikacja somanu za pomocą różnicowego spektrometru ruchliwości jonów
Przemysł Chemiczny, 2013, 92, 1, 55-59
IF = 0,367
- [H3] M. Ceremuga, **M. Maziejuk**, M. Szyposzyńska, T. Sikora
Oszacowanie temperatury efektywnej jonów somanu z zastosowaniem różnicowego spektrometru ruchliwości jonów
Przemysł Chemiczny, 2013, 92, 1, 96-100
IF = 0,367
- [H4] **M. Maziejuk**, M. Ceremuga, M. Szyposzyńska, T. Sikora
Wpływ temperatury na rozdział jonów sarinu (GB) w różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów
Przemysł Chemiczny 2013, 92, 6, 946-949
IF = 0,367
- [H5] A. Zalewska, **M. Maziejuk**, M. Ceremuga, A. Buczkowska, T. Sikora
Zastosowanie membran półprzepuszczalnych w analizatorach gazowych z detekcją opartą na różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów
Przemysł Chemiczny, 2014, 93, 4, 464-467
IF = 0,399
- [H6] **M. Maziejuk**, M. Ceremuga, M. Szyposzyńska, T. Sikora, A. Zalewska
Identification of organophosphate nerve agents by the DMS detector
Sensors and Actuators B, 2015, 213, 368-374
IF = 4,758
- [H7] **M. Maziejuk**, J. Puton, M. Szyposzyńska, Z. Witkiewicz
Fragmentation of molecular ions in differential mobility spectrometry as a method for identification of chemical warfare agents
Talanta, 2015, 144, 1201-1206
IF = 4,035
- [H8] **M. Maziejuk**, A. Szczurek, M. Maciejewska, T. Pietrucha, M. Szyposzyńska
Determination of benzene, toluene and xylene concentration in humid air using differential ion mobility spectrometry and partial least square regression
Talanta, 2016, 152, 137-146
IF= 4,035/2015
- [H9] Z. Witkiewicz, U. Perycz, **M. Maziejuk**, J. Puton
Coupling gas chromatography with ion mobility spectrometry
LCGC Europe, 2016, 29, 6, 294–303
IF = 0,481/2015
- [H10] A. Szczurek, **M. Maziejuk**, M. Maciejewska, T. Pietrucha, T. Sikora
BTX compounds recognition in humid air using differential ion mobility spectrometry combined with a classifier

Sensors and Actuators B, 2017, 240, 1237-1244

IF = 4,758/2015

Sumaryczny impact factor jednotematycznego cyklu publikacji wchodzącego w skład rozprawy habilitacyjnej według listy Journal Citation Reports : 19,996

4.3. Wykaz patentów stanowiących istotne osiągnięcie technologiczne i stanowiące podstawę osiągnięcia naukowego

- [1] Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometry (FAIMS) type ion mobility spectrometer chamber used for detection of chemical contamination has edge contacts made of silver paste, provided on edge surfaces of top and bottom ceramic plates
Patent Number: WO2012158052-A1 PL394898-A1 FI201305985-A GB2504884-A DE112012002128-T5 CN103534589-A EP2710362-A1 PL218395-B1 US2016069836-A1

- [2] Ion mobility spectrometer chamber, has ion current amplifier integrated with ion collecting electrode, and ceramic plate placed in casing that is made of plastic, where casing is fixed with ceramic rings through grooved slats.
Patent Number: PL396616-A1 PL218460-B1

- [3] Spectrometer chamber i.e. ion-mobility spectrometry chamber, for gas analysis, has control electrodes and collecting electrodes that are arranged at differential mobility spectrometer zone
Patent Number: WO2013122485-A1 PL398138-A1 WO2013122485-A8

- [4] Air intake of mobile pollution indicator, has flow resistance detector connected to air inlet and outlet to and from valve, while detector, sensor and valve are connected to microprocessor control system
Patent Number: WO2014189394-A1 PL403995-A1

- [5] Device for recognizing or detecting e.g. toxic industrial substances in motor vehicle, has chamber supported on inlet and outlet supports having gas feeding hole and gas discharge hole to/from chamber in flat top surfaces of chamber
Patent Number: WO2014098630-A1 PL402111-A1

- [6] Dehumidifying and purifying system for air serving in contamination indicators, has chamber that is connected in parallel to inlet and outlet of gas, filter and orifice are located between outlet and inlet to chamber
Patent Number: WO2014200370-A1 PL404290-A1

[7] Instrument for determination of contamination, has exchanger with semi-permeable membrane which is arranged between two Differential Mobility Spectrometry (DMS) chambers

Patent Number: WO2015112033-A1 PL406896-A1

4.4. Omówienie prac stanowiących celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wstęp

Skażenia niebezpiecznymi substancjami chemicznymi stanowią poważne zagrożenia dla środowiska naturalnego oraz dla zdrowia i życia ludzi. Do ostrzegania o możliwych zagrożeniach służą sygnalizatory skażeń chemicznych [1], które wykrywają bojowe środki trujące (BST) [2] oraz toksyczne substancje przemysłowe (TSP). Wczesne ostrzeganie przed skażeniami jest w obecnych czasach niezwykle ważne. W przypadku wojny lub ataku terrorystycznego bardzo istotne jest szybkie wykrywanie BST i TSP z wysoką czułością i niezawodnością. Niedawno, BST zostały użyte w konflikcie w Syrii, a wcześniej w Iraku. Skuteczną metodą, która umożliwia ciągły monitoring powietrza jest spektrometria ruchliwości jonów (ang. ion mobility spectrometry, IMS) [3]. Jest ona wręcz idealną metodą do zastosowania w sygnalizatorach skażeń ze względu na możliwość wykrywania i identyfikacji większości substancji organicznych uznawanych za wysokotoksyczne.

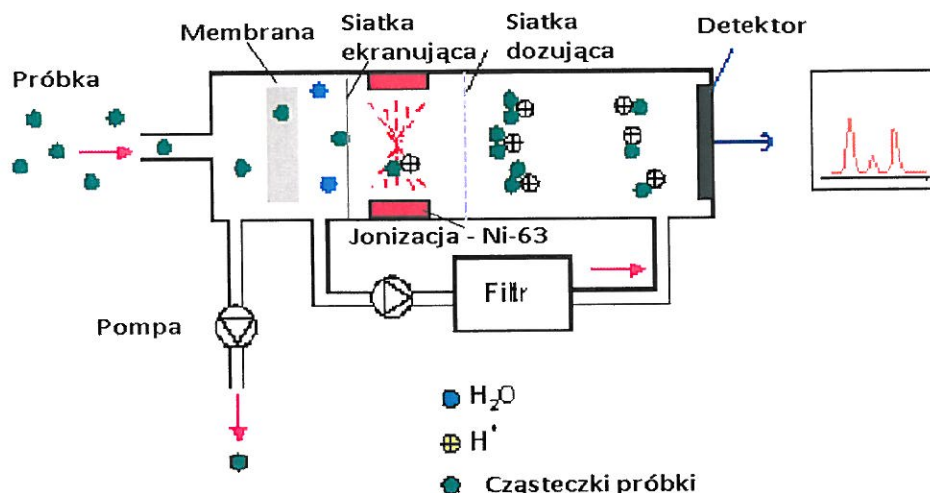
Drugim aspektem jest monitoring powietrza w kontekście wykrywania lotnych substancji organicznych LZO (ang. volatile organic compounds, VOCs) [4,5]. Coraz częściej wskazuje się na potrzebę ciągłej kontroli warunków pracy lub kontrolę powietrza w ważnych obiektach użyteczności publicznej. Badanie jakości powietrza wewnętrznego stanowi duże wyzwanie ze względu na dużą różnorodność związków organicznych obecnych w powietrzu wewnętrznym. Zróżnicowany poziom stężeń, na którym te związki występują również stanowi przeszkodę w ich oznaczaniu. W tym przypadku zastosowanie sygnalizatorów wykorzystujących spektrometrię ruchliwości jonów jest bardzo przydatne z uwagi na:

- bardzo krótki czas reakcji na pojawienie się substancji chemicznej – nawet pojedyncze sekundy;
- wysoką czułość na BST, jak i wiele LZO;
- stosunkowo niska cena.

Wprowadzenie do techniki spektrometrii IMS i DMS (ang. differential ion mobility spectrometry, DMS)

IMS wykorzystuje różnice w ruchliwości zjonizowanych cząsteczek w gazie nośnym pod wpływem pola elektrycznego [6-8]. Za klasyczny spektrometr IMS uznaje się taki, który posiada słabe liniowe pole elektryczne o wartości od 100 do 300 V/cm, w którym jony

przemieszczają się w gazie pod ciśnieniem atmosferycznym. Schemat budowy detektora IMS przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat konstrukcji spektrometru ruchliwości jonów.

Komora spektrometru IMS podzielona jest na dwa obszary: obszar jonizacji, który rozpościera się od siatki ekranującej (będącej na wysokim stałym potencjale) - do siatki dozującej oraz obszar rozdzielania jonów zwany obszarem dryftowym, od siatki dozującej do elektrody zbiorczej [9] (będącej na potencjale 0 V).

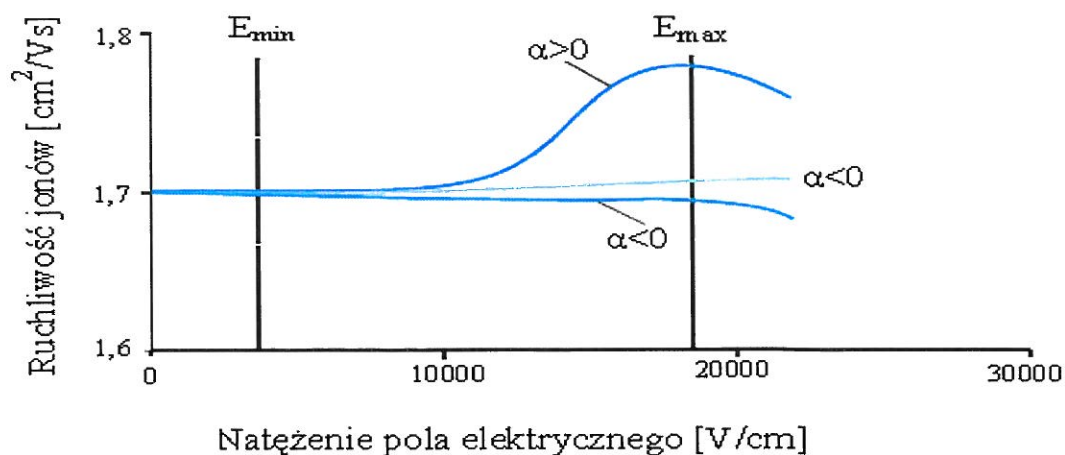
Siatka dozująca pełni rolę regulatora dopływu jonów do części dryftowej. Jony wpuszczane są przez czas od 30 do 300 μs , a następnie w obszarze dryftowym jony są rozdzielane ze względu na różną ich ruchliwość. Do elektrody zbiorczej docierają w różnych czasach, są to na ogół pojedyncze milisekundy do kilkudziesięciu milisekund (dla jonów o bardzo małej ruchliwości lub/i dla pola elektrycznego o małym natężeniu).

W obszarze dryftowym rozmieszczone są metalowe pierścienie, które kształtują pole w sposób liniowo malejący do elektrody zbiorczej. Przed elektrodą zbiorczą umieszczona jest siatka, która niweluje wpływ pojawiania się jonów na sygnał z elektrody zbiorczej.

Pole jest tak ukształtowane, by jony od obszaru siatki dozującej do elektrody zbiorczej, przemieszczały się po torach liniowych.

Zasada działania różnicowego spektrometru ruchliwości jonów

W przypadku słabych pól elektrycznych ruchliwość jonów praktycznie nie jest zależna od natężenia pola elektrycznego. Zwiększanie pola elektrycznego prowadzi do istotnej zmiany ruchliwości jonów, a zatem ruchliwość zmienia się w funkcji pola elektrycznego. Charakter tych zmian jest zależny od rodzaju jonów, ich masy, kształtu, temperatury gazu nośnego oraz energii jonu. Przykładowy sposób zmian ruchliwości jest pokazany na rys. 2.



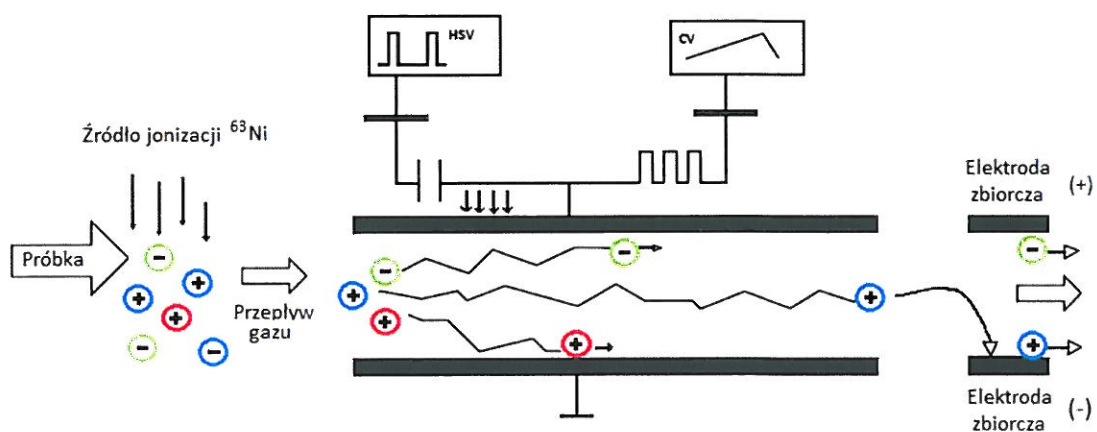
Rys. 2. Zależność ruchliwości jonów od natężenia pola elektrycznego [10].

Zależność ruchliwości jonów od pola elektrycznego ma postać:

$$K = K_0[1 + \alpha(E/N)] \quad (1)$$

gdzie: K_0 - ruchliwość zredukowana jonów dla słabego pola elektrycznego, $\alpha(E/N)$ - zależność zmiany ruchliwości zredukowanej w funkcji natężenia pola elektrycznego i gęstości molekularnej, K - ruchliwość jonów.

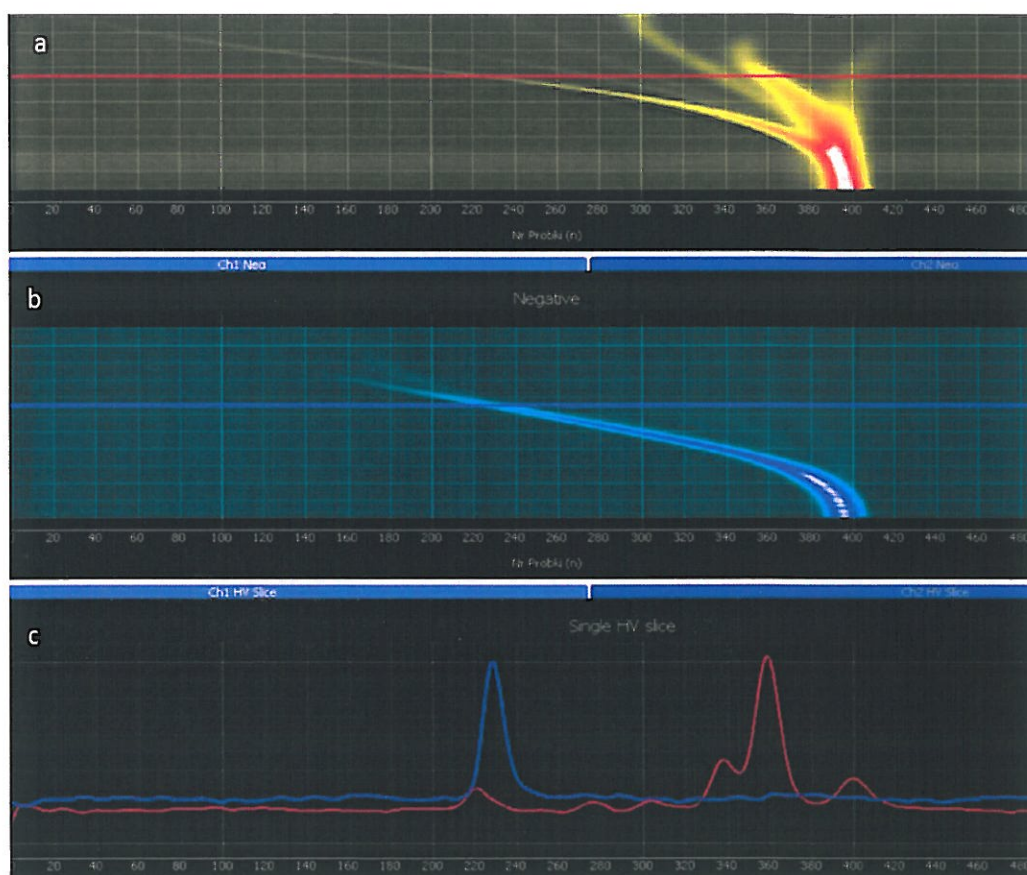
Detektor DMS zbudowany jest z przeciwległych płytek z naniesionymi elektrodami, do których przyłożone jest wysokie napięcie, które wytwarza pole elektryczne o dużym natężeniu oraz wysokiej częstotliwości [11]. Pod wpływem wytworzonego w objętości detektora pola elektrycznego, następuje segregacja jonów na elektrodzie zbiorczej.



Rys. 3. Schemat przepływu jonów przez spektrometr DMS [H8].

Obserwowany podział jonów obecnych w przepływającym gazie wynika z ich różnej ruchliwości w polach o mniejszym i większym natężeniu. Na rys. 3 przedstawiono

przykładowy przepływ jonów przez objętość komory detektora. Pod wpływem zmiennego pola elektrycznego przyłożonego do elektrod, następuje wychwycenie jonów, których ruchliwość nie spełnia warunku stabilnego przepływu przez komorę detektora. Mamy więc do czynienia ze swoistego rodzaju filtrem jonowym. Zatem w zależności od zmian napięcia kompensującego otrzymujemy spektrogram jak na rysunku poniżej.



Rys. 4. Wykresy rozproszenia zarejestrowane dla 2,3-dimetylo-2-butanolu a) w trybie jonów dodatnich, b) w trybie jonów ujemnych i c) dla konkretnego napięcia HSV.

Cel naukowy

Celem moich prac był rozwój techniki spektrometrii ruchliwości jonów, a w szczególności różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów oraz opracowanie nowych sposobów identyfikacji skażeń chemicznych dla tej techniki.

Ciągły monitoring powietrza przy wykrywaniu substancji toksycznych na bardzo niskim poziomie stężeń na ogół odbywa się za pomocą spektrometrów IMS lub DMS. Za pomocą tej techniki można wykryć substancje niebezpieczne dla człowieka nawet poniżej progu ich szkodliwego oddziaływania. Próg detekcji dla wielu z substancji to pojedyncze ppb czy nawet dziesiąte części ppb. Tak niskie stężenia wymagają umiejętne przygotowania wszystkich

elementów analizatora, począwszy od spektrometru poprzez układ gazowy, układ przygotowania gazu nośnego.

Drugi aspekt to metody analizy sygnału spektrometrycznego oraz badania nad zachowaniem się pojawiających pików dla różnych oddziaływań np. ciśnienia, temperatury, wilgotności czy wysokich stężeń substancji zakłócających.

Prace i patenty przedstawione w jednotematycznym cyklu publikacji **„Badania nad procesami identyfikacji substancji chemicznych za pomocą różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów oraz zastosowanie spektrometrii ruchliwości jonów do wykrywania skażeń chemicznych”** obejmowały następujące zagadnienia:

1. Zastosowanie klasycznego spektrometru ruchliwości jonów do wykrywania substancji niebezpiecznych - prace [H1], [H9], patent [2]
2. Badania różnicowego spektrometru ruchliwości jonów pod względem możliwości detekcyjnych – prace [H2], [H3], [H4], [H5], [H6], [H7], patenty [1], [3], [4], [5], [6], [7]
3. Nowe koncepcje identyfikacji substancji gazowych dla spektrometrii DMS – prace [H8], [H10].

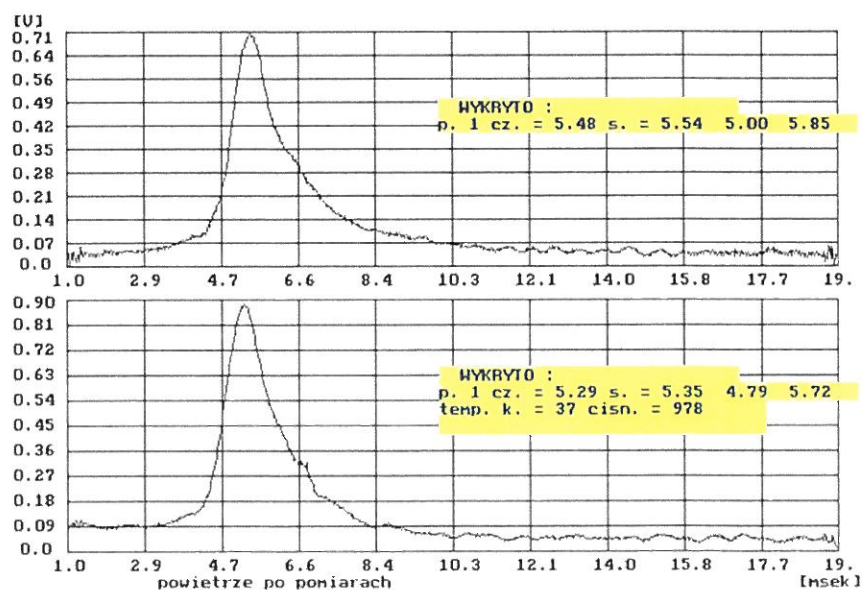
Zastosowanie klasycznego spektrometru ruchliwości jonów do wykrywania substancji niebezpiecznych

Technika spektrometrii ruchliwości jonów została opracowana w latach 1890-1910, lecz praktyczne rozwiązania zostały wprowadzone do technik analitycznych dopiero w latach sześćdziesiątych XX wieku. Do detekcji wysokotoksycznych substancji chemicznych najczęściej wykorzystuje się detektory, w których zastosowano technikę spektrometrii ruchliwości jonów [H1]. Konstrukcja komory IMS umożliwia zastosowanie jej w sygnalizatorach skażeń chemicznych. W Wojskowym Instytucie Chemii i Radiometrii został opracowany i wykonany (autor jest głównym konstruktorem) sygnalizator skażeń chemicznych ALERT z komorą IMS jako detektorem (rys. 5).

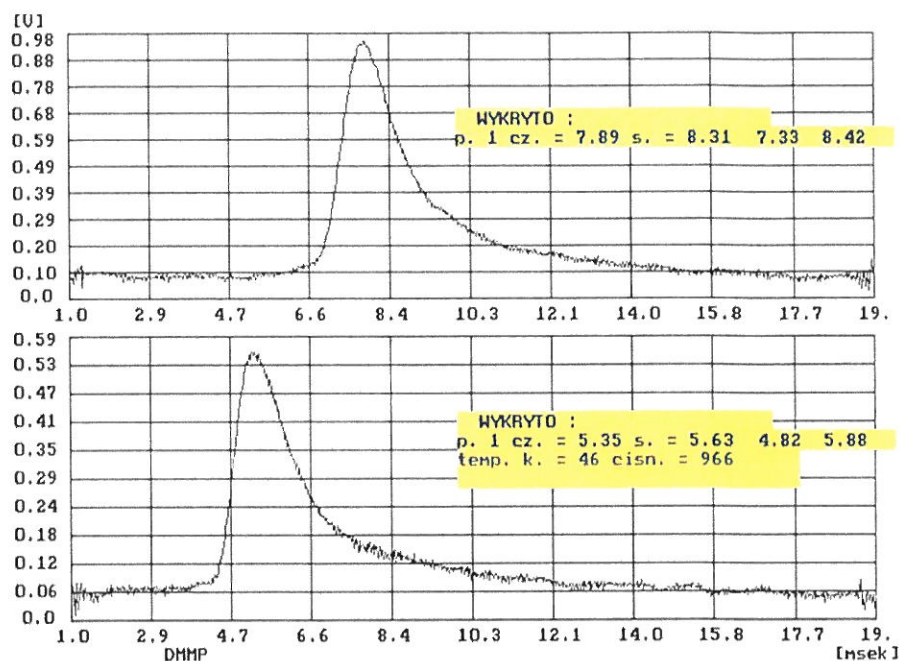


Rys. 5. Sygnalizator skażeń chemicznych ALERT-1M [H1].

Na rysunku 6 i 7 przedstawiono przykładowe spektrogramy zarejestrowane za pomocą sygnalizatora ALERT uzyskane w chwili braku skażenia i dla substancji testowej typu fosforoorganicznego. Identyfikacja wykrywanej substancji odbywa się przez porównanie widm. W przypadku braku analizowanej substancji na spektrogramie widoczny jest tylko pik od jonów reakcyjnych (ang. reactant ion peak, RIP) (rys. 6). Po wprowadzeniu do układu analizowanej substancji, na widmie pojawia się drugi pik od substancji testowej (rys. 7).

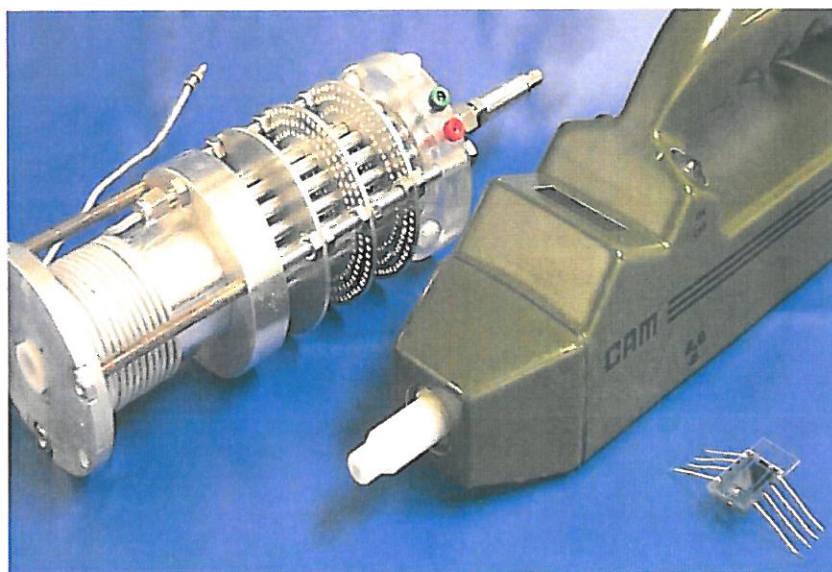


Rys. 6. Przykładowy spektrogram z sygnalizatora skażeń chemicznych typu ALERT w chwili braku skażenia (tylko sygnał od RIP) [H1].



Rys. 7. Przykładowy spektrogram w chwili podania substancji testowej typu fosforoorganicznego do sygnalizatora skażeń chemicznych typu ALERT [H1].

Wiele światowych firm rozwija technikę spektrometrii jonów otrzymując bardzo dobre rezultaty. Prace zmierzają do opracowania spektrometrów o bardzo wysokiej rozdzielczości, jak również przyrządów przenośnych w obudowach hand pocked wielkości kalkulatorów kieszonkowych. Na rys. 8 przedstawiono spektrometry IMS ilustrujące postępy w ich miniaturyzacji.

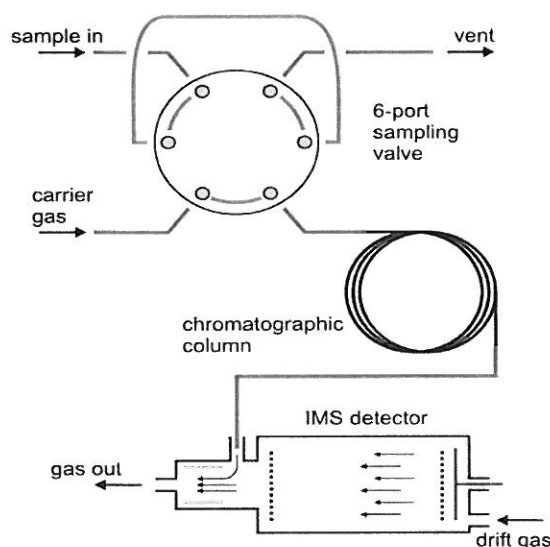


Rys. 8. Trzy generacje spektrometrów IMS [12] [H1].

Przyrząd pierwszy z lewej jest przykładem pierwszych konstrukcji spektrometrów. Pośrodku przedstawiona jest wersja handlowa gazosygnalizatora CAM do detekcji wysokotoksycznych substancji chemicznych. Po prawej widać najnowszą generację spektrometrów typu RF-IMS (ang. radio frequency ion mobility spectrometry, RF-IMS), których zasada działania jest podobna do pułapki jonowej.

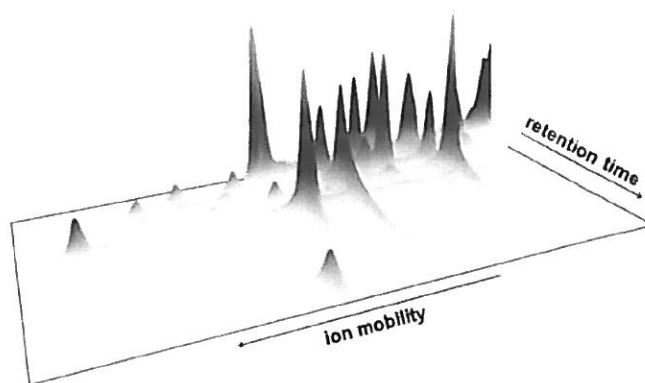
Tendencje rozwojowe wskazują, że w najbliższym czasie nie należy się spodziewać zmiany metod w wykrywaniu wysokotoksycznych substancji chemicznych. Nadal dominującą rolę będą odgrywały spektrometry ruchliwości jonów. Prace rozwojowe będą zmierzały do zwiększenia selektywności, zmniejszenia liczby fałszywych alarmów oraz budowy nowej generacji przyrządów, których zasada pracy będzie podobna do pułapki jonowej.

Na początku lat 70-tych XX wieku powstała koncepcja zastosowania spektrometru ruchliwości jonów, jako detektora do chromatografu gazowego (GC). Elektroda zbiorcza była dołączona do elektrometru a wynik był zapisywany na taśmie papierowej. Teoretyczne rozważania na temat GC-IMS przedstawiłem w pracy [H9]. Po raz pierwszy połączenie chromatografu gazowego ze spektrometrem ruchliwości jonów opisali Karasek i Keller [13]. W układach GC-IMS stosuje się kolumny kapilarne (ang. capillary columns, CCs) i kolumny multikapilarne (ang. multicapillary columns, MCCs). Kolumny kapilarne mają zbliżone rozmiary do kolumn stosowanych w GC (długość rzędu kilkudziesięciu metrów), w przeciwieństwie do krótkich kolumn multikapilarnych (długość rzędu kilkudziesięciu centymetrów). Na rysunku 9 przedstawiono schemat połączenia chromatografu gazowego z detektorem IMS. Układy GC-IMS są dostępne komercyjnie. Możliwa jest również miniaturyzacja tego układu [14,15].



Rys. 9. Układ sprzężony typu GC-IMS [H9].

Z definicji, spektrometry ruchliwości jonów są urządzeniami, które wykonują bardzo szybką analizę. W związku z tym, korzyścią z połączenia GC-IMS jest „szybka” chromatografia gazowa [16,17,18]. Analiza metodą GC-IMS jest zazwyczaj zakończona w ciągu 3 do 5 minut. W wyniku analizy GC-IMS otrzymujemy trójwymiarowe widmo będące zależnością intensywności sygnału od czasu retencji i czasu dryftu. Przykład takiego widma przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Przykład trójwymiarowego widma uzyskanego z układu GC-IMS [19], [H9].

Układ GC-IMS ze względu na liczne zalety znalazł zastosowanie m.in. do wykrywania materiałów wybuchowych [20], bojowych środków trujących [21], lotnych związków organicznych [22], a także w bezpośredniej analizie wydychanego powietrza [23].

Kolejne prace dotyczą drugiego wariantu techniki spektrometrii ruchliwości jonów, czyli różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów.

Badania różnicowego spektrometru ruchliwości jonów pod względem możliwości detekcyjnych

Zastosowanie w analizatorach i sygnalizatorach zmodyfikowanych technik spektrometrii ruchliwości jonów wymaga ich badania, sprawdzenia ich funkcjonalności, możliwości detekcyjnych oraz podatności na fałszywe alarmy.

Badania zostały podzielone na następujące działy:

- **badanie wpływu temperatury i wilgotności na położenie pików;**
- **badanie fragmentacji jonów jako metoda identyfikacji substancji chemicznych.**

Badania wpływu temperatury i wilgotności na położenie pików

Identyfikacja substancji jest dokonywana na podstawie ruchliwości zredukowanej (ruchliwość odniesiona do standardowych warunków, temperatura, ciśnienie, pole elektryczne).

Standardową formułą przeliczającą dane jest zależność (2). Jest to zależność dobrze odzwierciedlająca rzeczywiste pomiary w przypadku, gdy wilgotność w komorze IMS jest stała.

$$K_o = K \cdot \left(\frac{273}{T} \right) \cdot \left(\frac{P}{760} \right) \quad (2)$$

Wpływ wilgotności na ogół jest eliminowany poprzez wprowadzenie membrany [H5]. Gdy wilgotność rośnie, wówczas ruchliwość jonów maleje, na skutek wzrostu liczby dołączonych cząsteczek wody $M^+(H_2O)_n$ (rośnie wartość n).

W przypadku różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów zachowanie jonu jest podobne tzn. wraz ze wzrostem wilgotności rośnie liczba cząsteczek wody. Podobnie z temperaturą – wzrost temperatury powoduje spadek liczby obojętnych cząsteczek (np. wody) oraz wzrost długości drogi swobodnej jonu. Wzrost ciśnienia powoduje skrócenie drogi swobodnej jonu. Zatem w przypadku wyrażenia pola elektrycznego jako E/N , gdzie N jest liczbą cząsteczek gazu czyli tzw. pole zredukowane, wpływ ciśnienia na położenie pików jest zniwelowany, nie obserwujemy wtedy odchyłek.

Wpływ temperatury nie jest skompensowany z uwagi na sposób pomiaru w spektrometrii różnicowej. Mierzona jest odchyłka ruchliwości jonu dla pola wysokiego w stosunku do pola niskiego, a zatem zmiana ruchliwości jest zależna od temperatury jonu oraz temperatury gazu dryftowego. Liczba cząstek obojętnych zaasocjowanych do jonu dla fazy wysokiego pola i niskiego jest różna. Gdy dochodzimy do bardzo wysokich wartości pól, wówczas liczba cząstek zaasocjowanych jest równa 0. Dochodzi wtedy do „zgięcia się” charakterystyki ruchliwości. Ruchliwości już nie rośnie, lecz zaczyna maleć z uwagi na wzrost temperatury efektywnej jonu i zgodnie z zależnością teoretyczną publikowaną w większości podręczników dla spektrometrii ruchliwości jonów ruchliwość maleje.

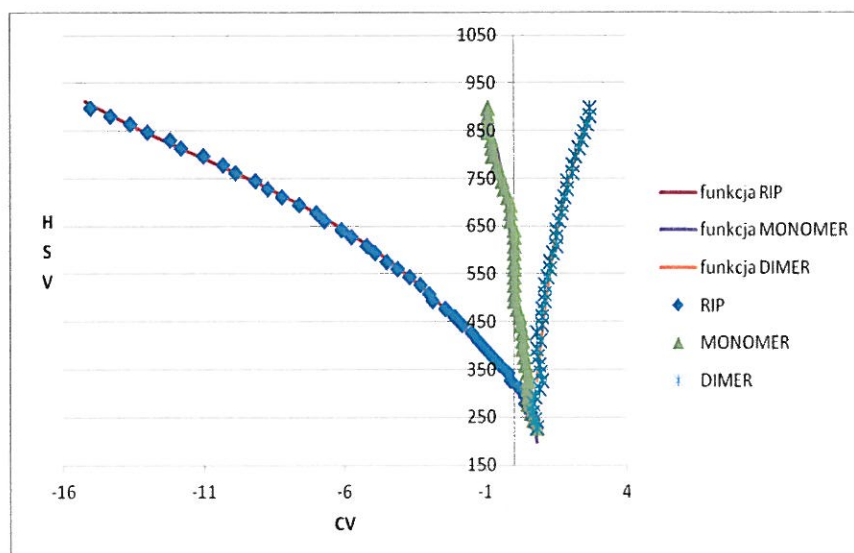
$$K = \frac{3q}{16N} \cdot \left(\frac{2\pi}{\mu k T_{ef}} \right)^{1/2} \frac{1 + \alpha}{\Omega} \quad (3)$$

Identyfikację BST za pomocą DMS na przykładzie somanu przedstawiłem w pracy [H2]. Identyfikacji somanu (GD) dokonano na podstawie aproksymacji przy pomocy wielomianów 3-go stopnia. Funkcje dla poszczególnych pików somanu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Funkcje dla poszczególnych charakterystycznych pików somanu przy różnych stężeniach somanu w powietrzu [H2].

FUNKCJA	15 µg/m ³
RIP	$f(x) = -0,1382x^3 - 4,5984x^2 - 77,2276x + 314,3172$
MONOMER	$f(x) = 178,1590x^3 - 74,3799x^2 - 519,7658x + 570,8439$
DIMER	$f(x) = 50,5508x^3 - 369,5784x^2 + 1078,1415x - 326,5221$
	42 µg/m ³
RIP	$f(x) = -0,1284x^3 - 4,3469x^2 - 75,4096x + 317,1723$
MONOMER	$f(x) = 213,8037x^3 - 46,7172x^2 - 522,9494x + 570,9054$
DIMER	$f(x) = 29,9050x^3 - 2934,2123x^2 + 1062,1092x - 462,3172$
	179 µg/m ³
RIP	$f(x) = -0,1260x^3 - 4,3251x^2 - 75,3104x + 316,9378$
MONOMER	$f(x) = 261,2156x^3 - 52,1516x^2 - 560,5966x - 568,6945$
DIMER	$f(x) = 42,0663x^3 - 353,8349x^2 + 1155,6702x - 522,0765$
	316 µg/m ³
DIMER	$f(x) = 112,9428x^3 - 821,8646x^2 + 2148,7777x - 1198,2012$

Jeśli wierzchołki pochodzące od monomeru bądź dimeru zostaną połączone dla wszystkich napięć HSV, wówczas otrzymamy krzywą będącą odzwierciedleniem badanej substancji (rys. 11). Krzywe wzorcowe zostają zapisane do pamięci w procesie skalowania. Identyfikacja wykrywanych substancji polega na określaniu nowo powstałej krzywej z krzywą zapisaną w pamięci. Sprawdzanie to odbywa się przy pomocy odchylenia średniokwadratowego.

Rys. 11. Wykres funkcji otrzymanych dla somanu o stężeniu 15 µg/m³ z naniesionymi punktami otrzymanymi w wyniku badań [H2].

Funkcje wielomianowe umożliwiają aproksymację krzywych doświadczalnych (otrzymywanych z pomiarów rzeczywistych), dzięki czemu możliwe jest jednoznacznie ustalenie położenia pików charakterystycznych w zależności od napięcia generatora pola elektrycznego w spektrometrze. Zauważono również, że funkcje aproksymujące są w większym (RIP) lub mniejszym (DIMER) stopniu zbieżne z bliźniaczymi funkcjami otrzymanymi w tych samych warunkach pomiarowych, lecz dla innego stężenia substancji. Fakt ten może zostać wykorzystany do stworzenia tzw. „odcisków palców” BST.

Taka identyfikacja jest bardzo precyzyjna, lecz niestety wymaga bardzo dużej ilości pomiarów dla różnych napięć HSV.

Wiele z substancji np. iperyt siarkowy (HD), luizyt czy salicylan metylu (MS) są wykrywane, gdy wilgotność gazu nośnego wraz z badaną próbką nie przekracza 5%. W pracy [H5] pokazałem jak dobrać materiał barierowy dla sygnalizatora PRS-1W i jaki jest wpływ wilgotności na możliwości wykrywania par i gazów. Przebadano trzy rodzaje filmów polimerowych o różnym stężeniu, które stanowią warstwę aktywną membrany: polidimetylosiloksan (PDMS), polieteroamid (PEBAX) i poli(glikol etylenowy) (PEOX). W tabeli 2 i 3 zestawiono wyniki badań przeprowadzonych dla somanu i iperytu siarkowego. Najlepszą przepuszczalność analitu wykazywały membrany z nałożonym filmem polimerowym PDMS i PEBAX o stężeniu 5%.

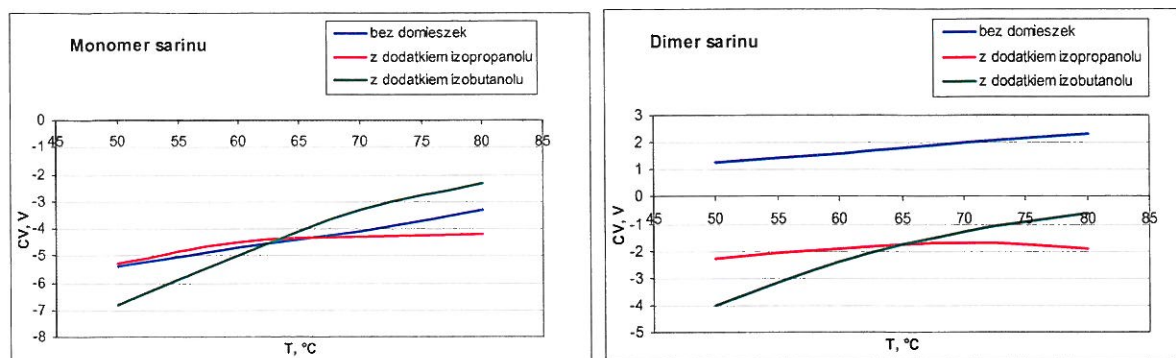
Tabela 2. Wyniki detekcji iperytu siarkowego w układzie z membraną półprzepuszczalną [H5].

Film polimerowy (membrana)	Stężenie iperytu siarkowego, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Amplituda piku iperytu siarkowego, j.a.
—	250	600
	800	1200
PDMS 1%	237	364
	792	846
PDMS 5%	285	284
	800	650
PEOX 10% (5 mm/min)	250	111
	880	295
PEOX 10% (2.5 mm/min)	247	229
	815	570
PEBAX 3%	221	174
	811	380

Tabela 3. Wyniki detekcji somanu w układzie z membraną półprzepuszczalną [H5].

Film polimerowy (membrana)	Stężenie somanu, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Amplituda piku somanu, j.a.
—	22	498
	60	1063
	155	1520
PDMS 0,1%	19	154
	53	385
	130	616
PDMS 0,5%	10	119
	32	196
	89	477
PDMS 1%	28	154
	66	267
	140	434
PDMS 5%	29	147
	51	276
	215	798
PDMS 7%	20	Poniżej progu wykrywalności
	56	128
	137	235
PEOX 10% (5 mm/min)	44	Poniżej progu wykrywalności
	78	Poniżej progu wykrywalności
	140	50
PEOX 10% (2.5 mm/min)	37	161
	70	207
	100	309
PEBAX 5%	20	Poniżej progu wykrywalności
	45	219
	250	669

Kolejna praca dotyczyła zachowania się jonów GB dla różnych temperatur gazu nośnego [H4]. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono że położenie piku oraz punkt rozpadu zależy od temperatury gazu nośnego.



Rys. 12. Zależność napięcia kompensacyjnego od temperatury gazu nośnego [H4].

Ze wzrostem temperatury występowało przesunięcie pików pochodzących od dimeru i monomeru sarinu w kierunku wyższych wartości napięcia kompensacyjnego (CV). Zależność napięcia CV od temperatury dla monomeru i dimeru sarinu przedstawiono na rys. 12. Największy wpływ temperatury był w przypadku, gdy gaz nośny zawierał izobutanol. Interesujący jest przebieg krzywej dla dimeru somanu. W przypadku nieobecności domieszek w gazie nośnym, pik od dimeru występuje przy dodatnich wartościach napięcia CV. Po wprowadzeniu domieszek do gazu nośnego obserwowano przesunięcie pików w kierunku ujemnych wartości napięcia CV.

Badanie fragmentacji jonów jako metoda identyfikacji substancji chemicznych.

Bardzo wysokie pole elektryczne powoduje, że temperatura efektywna jonu jest znacznie wyższa niż temperatura gazu nośnego. Zatem pod wpływem zderzeń jonów z obojętnymi cząsteczkami gazu nośnego może dojść do rozpadu jonu.

Całkowita energia jonu jest sumą energii termicznej (równej energii termicznej otaczającego gazu) i energii uzyskanej z pola elektrycznego:

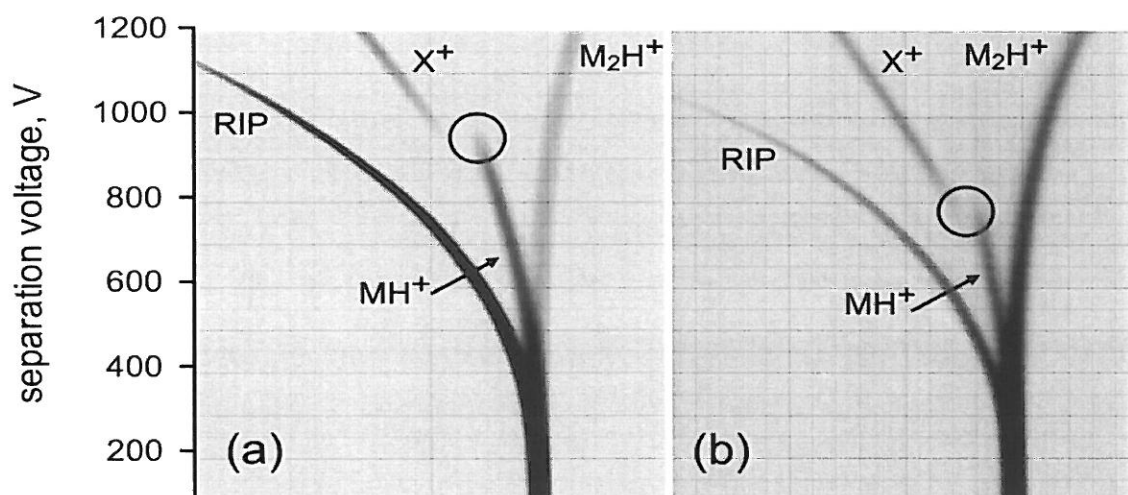
$$\frac{3}{2}kT_{eff} = \frac{3}{2}kT + \frac{1}{2}Mv_d^2 \quad (4)$$

gdzie: k - jest stałą Boltzmanna, T_{eff} - temperaturą efektywną jonu, M - masą cząsteczki gazu dryftowego, a v_d - prędkością jonu wynikającą z dryftu w polu elektrycznym. W przypadku niskich wartości pola elektrycznego temperatura efektywna jonu jest równa temperaturze termodynamicznej T .

Gdy pole jest wysokie, powyżej 10 kV/cm, rozproszenie energii jonu dostarczane przez pole pomiędzy zderzeniami nie jest pełne, co powoduje, że podwyższanie pola prowadzi do wzrostu energii jonu. Energię tę można przeliczyć na temperaturę [H3]. Wzrost T_{eff} wskazuje na przekroczenie energii rozpadu cząsteczki, czego konsekwencją jest rozpad monomeru. Dla ściśle określonych energii pojawiają się piki pochodzące z rozpadu monomeru, które są charakterystyczne dla analizowanego związku. Określenie temperatury rozpadu cząsteczki jest rzeczą niesłychanie ważną ze względu na jej specyficzność, gdyż każdy jon posiada jej własną, niepowtarzalną wartość. W związku z tym nie tylko położenie pików na spektrogramie,

lecz również temperatura efektywna jonu może służyć identyfikacji rodzaju substancji. Znajomość wartości temperatury efektywnej stanowić może bardzo dokładny parametr identyfikacyjny wszelkiego rodzaju skażeń powietrza. Oszacowanie tego parametru może znacznie wpłynąć na wzrost selektywności analizy wykorzystującej spektrometr ruchliwości jonów z silnym asymetrycznym polem elektrycznym.

Podobnie w pracy [H7] wykazałem, że niezależnie od rodzaju spektrometru DMS (DMS #1 - odległość między elektrodami 0,25 mm albo DMS #2 - odległość między elektrodami 0,5 mm) i od temperatury gazu nośnego, punkty fragmentacji zależą od energii jonu, którą można wyliczyć. Wykonano to dla sarinu (GB), iperytu siarkowego oraz salicylanu metylu. Przykładowe wyniki badań wpływu temperatury analizatora na kształt wykresów rozproszenia pokazano na rys. 13. Badania wykonane były dla GB za pomocą detektora DMS #1.



Rys. 13. Widma rozproszenia zarejestrowane dla sarinu w (a) 0°C i (b) 40°C [H7].

Dokładne określenie wartości napięcia separującego (SV), przy którym następuje rozpad jonów monomerowych jest trudne. W celu ujednolicenia sposobu analizy wyników przyjęto, podobnie jak w pracy [26], że wartość napięcia odpowiadającego fragmentacji jonów będzie szacowana na podstawie zaniku intensywności piku rozpadających się jonów. Pełne wyniki badań wpływu temperatury detektora na wartość napięcia SV przy którym następuje rozpad GB przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Wartości napięć separujących odpowiadające rozpadowi jonów monomerowych GB [H7].

ambient temperature, °C	detector temperature, °C	SV amplitude for fragmentation, V	E/N, Td)*
-10	0	955	107
0	10	930	105
10	20	875	102
20	30	830	100
40	40	760	94
40	50	710	91
40	60	685	91
40	70	665	91
40	80	630	88

)* Wartość E/N obliczono na podstawie maksymalnego napięcia separującego uwzględniając współczynnik wypełnienia i zmiany gęstości gazu z temperatur.

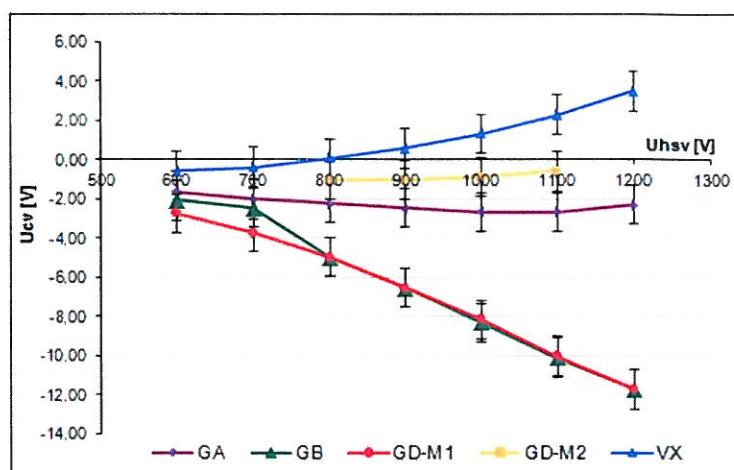
W ramach prowadzonych prac nad różnicową spektrometrią ruchliwości jonów opracowałem sygnalizator PRS-1W (rys. 14), opisany w publikacji [H6] oraz sygnalizator NCR (Nuclear Chemical Radiological) zastosowany na robocie do wykrywania skażeń chemicznych i promieniotwórczych [M2], [M3]. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w tym detektorze zostały opatentowane (patenty 1, 3, 4, 5, 6, 7). Sposób identyfikacji substancji chemicznych z użyciem sygnalizatora PRS-1W został opisany w publikacji [H6].



Rys. 14. Sygnalizator skażeń chemicznych PRS-1W [H6].

Dla różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów pełne widmo (3D) jak na rys. 4a jest zbierane przez ok. 1 minutę, natomiast dla pojedynczego widma dla jednego z wybranych napięć HSV (rys. 4c) tylko przez 0,4 sek. Zatem ograniczono znacznie ilość danych do analizy poprzez

wybranie najistotniejszych pojedynczych widm. Wybrano następujące napięcia HSV 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 i 1200 V, a następnie wyznaczono położenie pików, które skorygowano dla aktualnych warunków pomiarowych tzn. temperatura, ciśnienie i wilgotność do warunków odniesienia (temperatura gazu 45°C, ciśnienie 1023 mbarów, wilgotność 50 ppm). Na podstawie skorygowanego położenia pików wyznacza się rodzaje substancji. Miejsca pojawiania się pików dla BST w standardowych warunkach przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15. Krzywe identyfikacji związków fosforoorganicznych na podstawie ich monomerów [H6].

Nowe koncepcje identyfikacji i określania stężenia substancji gazowych dla spektrometrii DMS

Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów umożliwia zbieranie widm 3D, które dostarczają bardzo dużo informacji. Pełne skanowanie trwa ok. 40 sekund. W przypadkach gdy zmiana stężenia substancji chemicznych jest wolnozmienna (powyżej minut) można zastosować algorytmy z długim czasem zbierania danych i zastosować metody analizy danych, które w spektrometrii ruchliwości jonów jeszcze nie były stosowane.

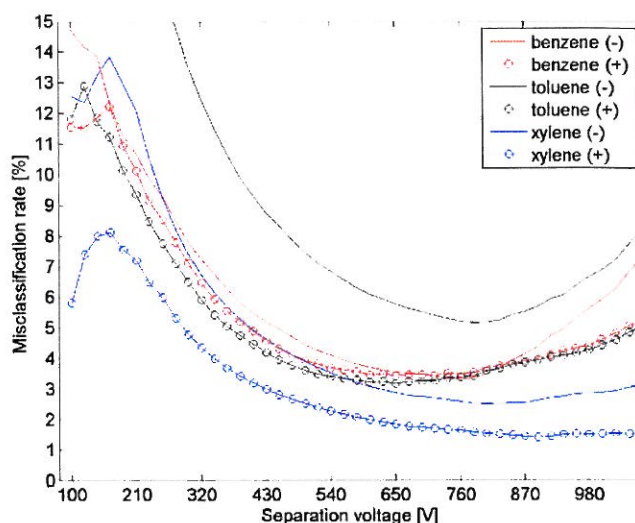
Pierwszą metodę opisałem w pracy [H2], która dotyczy identyfikacji somanu na podstawie aproksymacji przy pomocy wielomianów 3-go stopnia.

Jeśli pojedynczy fragment widma (określone napięcie HSV oraz CV) potraktujemy jak odpowiedź z czujnika chemicznego wówczas pełne widmo można potraktować jak macierz wirtualnych czujników dowiązanych do danych ze spektrometru DMS [H8] i [H10].

Jednym z nich jest algorytm najbliższych sąsiadów (k-nn), publikacja [H10]. W tym przypadku klasyfikacja polega na przyporządkowaniu pomiaru do jednego z trzech badanych związków (benzen, toluen, ksylen) w obecności pary wodnej. Za pomocą klasycznej spektrometrii ruchliwości jonów benzen i ksylen są praktycznie nie rozróżnialne, a toluen słabo rozróżnialny od benzenu i ksylenu.

W przypadku DMS przy zastosowaniu klasycznej analizy pików również pojawiają się trudności podczas klasyfikacji tych związków. Zastosowanie algorytmu najbliższych sąsiadów wykazało, że na bardzo wysokim poziomie ufności można te związki rozróżniać.

Na rys. 16 pokazano współczynnik błędnego przyporządkowania tych związków w funkcji napięcia HSV przy braku analizy najbliższych sąsiadów.



Rys. 16. Wykres zależności napięcia separującego od współczynnika błędnego przyporządkowania dla benzenu, toluenu i ksylenu [H10].

Po zastosowaniu algorytmu k-nn najbliższych sąsiadów dla wszystkich napięć CV i HSV uzyskano wyniki, które zestawiono w tabeli 5 (wyniki przedstawiono oddzielnie dla jonów dodatnich i ujemnych).

Tabela 5. Wyniki otrzymane dla benzenu, toluenu i ksylenu dla wszystkich napięć CV i HSV [H10].

Jon	Współczynnik błędnej identyfikacji [%]		
	benzen	toluen	ksylen
ujemny	0	0	0
dodatni	0.72	0.73	0

Przytoczone dane wskazują, że dzięki zastosowaniu nowych metod klasyfikacji substancji chemicznych dla spektrometru DMS można uzyskać znakomite rezultaty dla identyfikacji różnorodnych substancji chemicznych.

Po rozpoznaniu rodzaju związku (np. jak przedstawione powyżej) należy określić stężenie toksycznych substancji i w tym przypadku można zastosować zaawansowane metody matematyczne np. regresję jednowymiarową [H8]. Zmienną zależną w modelu regresji jest stężenie badanego związku. Zmienną wejściową była amplituda napięcia na elektrodzie zbiorczej dla jonów dodatnich i ujemnych spektrometru DMS w zależności od napięcia

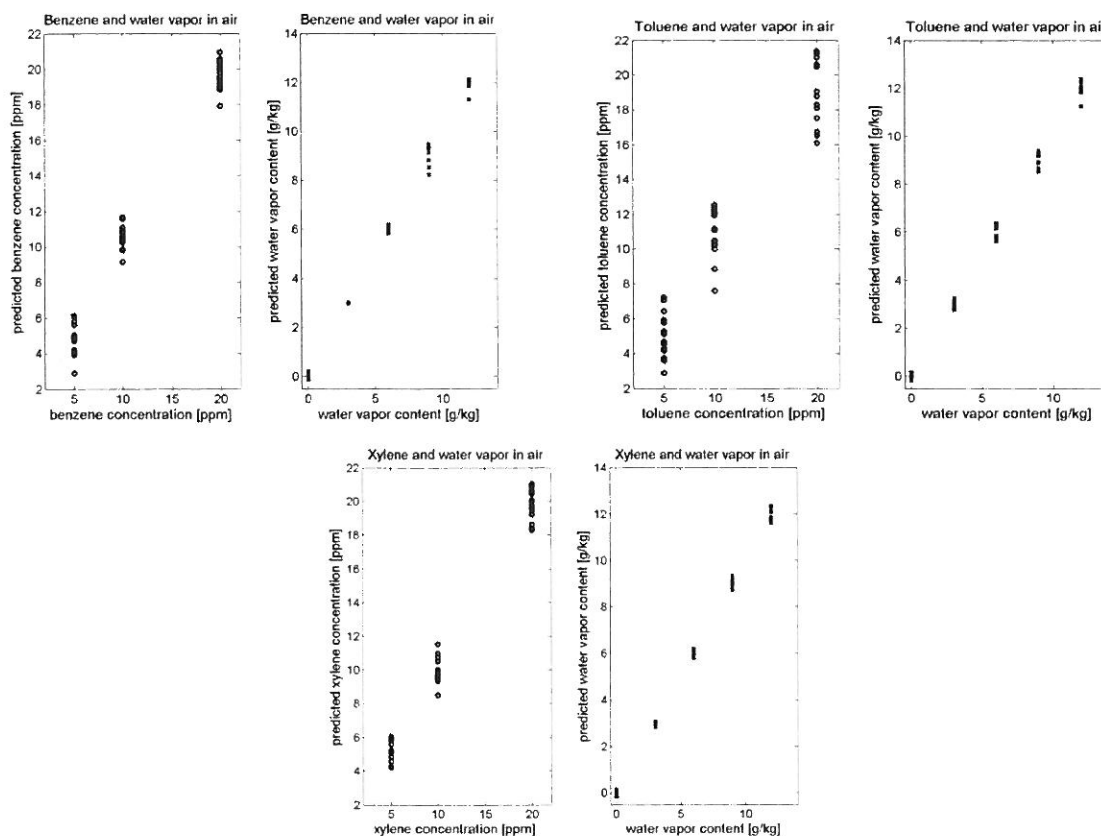
separującego i napięcia kompensacyjnego. Dwie funkcje: liniowe (5) oraz równanie kwadratowe (6) były traktowane jak model relacji między zmiennymi zależnymi i niezależnymi.

$$y = ax + b + \varepsilon \quad (5)$$

$$y = ax^2 + bx + c + \varepsilon \quad (6)$$

Kombinacje napięcia separującego i napięcia kompensacyjnego uznano, jako źródła informacji chemicznej. Do obliczeń brano punkty, których wartość przekraczała tło (szum elektryczny). Model regresji, dla każdego ze związku chemicznego dla którego wyznaczano stężenie, został zbudowany indywidualnie.

Wyniki obliczeń wyraźnie wskazują, że metoda regresji PLS (ang. partial least squares, PLS) bardzo dobrze opisuje stężenie benzenu, ksylenu, toluenu oraz stężenia pary wodnej w powietrzu dla spektrometru DMS. Może być, więc stosowana, jako jedna z nowych metod analitycznych w tego rodzaju spektrometrach.



Rys. 17. Wyniki oznaczenia stężenia (a) benzenu i wody (b) toluenu i wody oraz (c) ksylenu i wody w za pomocą DMS i regresji PLS [H8].

Z przedstawionych publikacji wynika, że na podstawie danych ze spektrometru oraz po zastosowaniu nowych sposobów analizy (choć znanych w chemometrii), lecz dotychczas nie

stosowanych przy analizie danych z takiego spektrometru IMS/DMS, można znacznie poprawić jakość wyniku końcowego tzn. znacznie zredukować możliwość błędnej identyfikacji oraz znacznie poprawić dokładność w określaniu stężenia wykrytych substancji.

Podsumowanie

Spektrometria ruchliwości jonów jest techniką, która ze względu na swoją czułość i wysoką specyficzność może być stosowana w ochronie ludzi przed niebezpiecznymi substancjami. Jest ona nadal perspektywiczna w wielu obszarach techniki.

Przedstawione publikacje wskazują na ciągły rozwój IMS, a co za tym idzie coraz lepszą identyfikację wykrywanych substancji chemicznych. Prace mają efekt praktyczny polegający za zastosowaniu IMS w sygnalizatorach skażeń chemicznych. Ostatnie publikacje wskazują na możliwość zastosowania tej techniki do oceny powietrza wewnętrznego czy nawet do badania oddechu człowieka celem szybkiej diagnozy stanu zdrowia. Te zagadnienia będą kolejnym obszarem zastosowania ww. prac.

LITERATURA

- [1] R. Sferopoulos, A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Commercial-Off-The-Shelf Items, Human Protection and Performance Division DSTO Defence Science and Technology Organisation, Victoria 3207, Australia (2009).
- [2] S. Yamaguchi, R. Asada, S. Kishi, R. Sekioka, N. Kitagawa, K. Tokita, S. Yamamoto, Y. Seto, Detection performance of a portable ion mobility spectrometer with ^{63}Ni radioactive ionization for chemical warfare agents, *Forensic Toxicol.*, 28 (2010) 84–95.
- [3] G.A. Eiceman, Z. Karpas, H.H. Hill Jr., *Ion Mobility Spectrometry*, 3rd ed., CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, 2013.
- [4] W. Vautz, J.I. Baumbach, E. Uhde, Detection of emissions from surfaces using ionmobility spectrometry, *Anal Bioanal Chem.*, 384 (2006) 980–986.
- [5] G. A. Eiceman, E. G. Nazarov, B. Tadjikov, R. A. Miller, Monitoring volatile organic compounds in ambient air inside and outside buildings with the use of a radio-frequency-based ion-mobility analyzer with a micromachined drift tube, *field analytical chemistry and technology* 4 (2000) 297–308.
- [6] H. Borsdorf, G.A. Eiceman, *Ion mobility spectrometry: principles and applications*, *Applied Spectroscopy Reviews* 41 (2006) 323–375.
- [7] J. Stach, J.I. Baumbach, *Ion mobility spectrometry - basic elements and applications* *IJIMS* 5 (2002) 1–21.
- [8] G.A. Eiceman, *Ion-mobility spectrometry as a fast monitor of chemical composition* *Trends Anal. Chem.* 21 (2002) 259–275.
- [9] M. Maziejuk, *Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 2012.
- [10] R.A. Miller, E.G. Nazarov, G.A. Eiceman, A.T. King, A MEMS radio-frequency ion mobility spectrometer for chemical vapor detection, *Sensors and Actuators A* 91 (2001) 307–318.

- [11] M. Jakubowska, M. Maziejuk, M. Ceremuga, J. Siczek, W. Gallewicz, Ceramic DMS – type detector, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* 15 (2012) 99-108.
- [12] <http://www.army-technology.com/contractors/nbc/graseby/>.
- [13] F.W. Karasek, R.A. Keller, *J. Chromatogr. Sci.* 10 (1972) 626–628.
- [14] A.B. Kanu, and H.H. Hill Jr., Ion mobility spectrometry detection for gas chromatography *J. Chromatogr. A* 1177 (2008) 12–27.
- [15] M. Camara, N. Gharbi, A. Lenouvel, M. Behr, C. Guignard, P. Orlewski, D. Evers, Detection and Quantification of Natural Contaminants of Wine by Gas Chromatography–Differential Ion Mobility Spectrometry (GC-DMS), *J. Agric. Food Chem.* 61 (2013) 1036–1043.
- [16] E. Aguilera-Herrador, S. Cárdenas, V. Ruzsanyi, S. Sielemann, M. Valcárcel, Evaluation of a new miniaturized ion mobility spectrometer and its coupling to fast gas chromatography multicapillary columns, *J. Chromatogr. A* 1214 (2008) 143–150.
- [17] J. Luong, R. Gras, H.J. Cortes, R.A. Shellie, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* 15 (2012) 179–187.
- [18] S.A. Ghorashi, A.H. Alinoori, S. Hajjaligol, *Microelectr. J.* 45 (2014) 1634–1640.
- [19] W. Vautz, R. Slodzynski, C. Hariharan, L. Seifert, J. Nolte, R. Fobbe, S. Sielemann, B.C. Lao, R. Huo, C.L. Thomas, and L. Hildebrand, *Anal. Chem.* 85 (2013) 2135–2142.
- [20] G.A. Eiceman, E.V. Krylov, N.S. Krylova, Separation of ions from explosives in differential mobility spectrometry by vapor-modified drift gas, *Anal. Chem.* 76 (2004) 4937–4944.
- [21] C. Kwan, A.P. Snyder, R.P. Erickson, P.A. Smith, W.M. Maswadeh, B. Ayhan, J.L. Jensen, J.O. Jensen, A. Tripathi, Chemical Agent Detection Using GC-IMS: A Comparative Study, *IEEE Sensors Journal*, 10 (2010) 451-460.
- [22] M. Jünger, B. Bödeker, J.I. Baumbach, Detection of volatile organic compounds (VOCs) in exhaled breath of patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) by ion mobility spectrometry, *Anal. Bioanal. Chem.* 396 (2010) 471–482.
- [23] J.I. Baumbach, Ion mobility spectrometry coupled with multi-capillary columns for metabolic profiling of human breath, *J. Breath Res.* 3 (2009) 1–16.
- [24] H. Sohn, J. Steinhilber, Use of ion mobility spectrometry for the preliminary evaluation of hazardous military waste sites -opportunities and limitations, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* 1 (1998) 1-14.
- [25] G. Kaur-Atwal, G. O'Connor, A.A. Aksenov, V. Bocos-Bintintan, C.L.P. Thomas, C.S. Creaser, Chemical standards for ion mobility spectrometry: a review, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* 12 (2009) 1–14.
- [26] X. An, G.A. Eiceman, J.A. Stone, A determination of the effective temperatures for the dissociation of the proton bound dimer of dimethyl methylphosphonate in a planar differential mobility spectrometer, *Int. J. Ion Mobil. Spectrom.* 13 (2010) 25–36.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych**A) Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych****Monografie i rozdziały w monografiach zbiorowych**

- [M1] Monografia Maziejuk M., „Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów”, Wydawnictwo WAT, Warszawa 2012 r.
- [M2] Sikora T., Maziejuk M., Ceremuga M., Buczkowska A, Mobilne laboratorium do poboru próbek środowiskowych i identyfikacji zagrożeń biologicznych, rozdz. 4. Technologie mobilne w polowej identyfikacji zagrożeń biologicznych str. 73-87, monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2014 r., ISBN 978-83-72742-806-6.
- [M3] Maziejuk M., Lisowski W., Ceremuga M., Szyposzyńska M., Mobilne laboratorium do poboru próbek środowiskowych i identyfikacji zagrożeń biologicznych, rozdz. 5. „Innowacyjny czujnik NRC do detekcji skażeń chemicznych wykorzystujący hybrydowy układ IMS-DMS”, str. 87-107, monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2014 r., ISBN 978-83-72742-806-6.
- [M4] Sikora T., Maziejuk M., Ceremuga M., Buczkowska A., Opracowanie koncepcji detektora do wykrywania skażeń biologicznych metodą fluorescencji wzbudzonej, II Międzynarodowa Konferencja Naukowa EpiMilitaris 2013 – Bioterroryzm, Warszawa 2013, str. 183-196.
- [M5] Maziejuk M. , Ceremuga M. „Ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń”, T.2 Redakcja naukowa: Z. Mierczyk R. Ostrowski, Rozdział: „Nowoczesne metody detekcji skażeń chemicznych”, str. 179-191, ISBN: 978-83-62954-09-4, Wydawnictwo WAT 2011.
- [M6] Maziejuk M., Ceremuga M., XXIV Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Ochrona ludności przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń Ekomilitaris 2010, praca zbiorowa pod redakcją Z. Mierczyka, J. Wasilczuka, Zakopane 7-10 września, Nowoczesne metody detekcji skażeń, str. 253-264.

Publikacje

- [P1] Maziejuk M., Lisowski W., Szyposzyńska M., Sikora T., Zalewska A., Differential ion mobility spectrometry in application to the analysis of gases and vapors, Solid State Phenomena Vol. 223, (2015), 283-290.
- [P2] Maziejuk M., Lisowski W., Ceremuga M., Szyposzyńska M., Differential ion mobility spectrometry-application and development prospects, Analityka, 4, (2014), 8-15.
- [P3] Harmata W., Maziejuk M., Ceremuga M., Detektory do wykrywania skażeń chemicznych dla bezzałogowej platformy lądowej (STRAŻAK), Bezpieczeństwo i technika pożarnicza, 33, (2014), 93-105.
- [P4] Jakubowska M., Maziejuk M., Ceremuga M., Siczek J., Gallewicz W., Ceramic DMS – type

detector, International Journal for Ion Mobility Spectrometry, (2012), 15, 99-108.

- [P5] Maziejuk M., Mierczyk J., Spektrometry ruchliwości jonów w zastosowaniu do wykrywania bojowych substancji toksycznych, Biuletyn WAT, 1, (2007), 159-177.

B) Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi i udział w takich projektach

- Projekt indywidualny: Badania własności zjonizowanych cząsteczek BST w zmiennym polu elektrycznym o wysokim natężeniu i o wysokiej częstotliwości, Nr PB 0033/TOO/2003/24, kierownik projektu.
- Zastosowanie układu FAIMS-IMS do detekcji skażeń chemicznych, projekt rozwojowy Nr O R00 0008 12, 2010-2012, główny wykonawca.
- Mobilne laboratorium do poboru próbek środowiskowych i identyfikacji zagrożeń biologicznych, Nr O ROB 0031/01/D 31/1, 2011-2014, główny wykonawca.
- Przenośny sygnalizator skażeń, projekt rozwojowy Nr O ROB/0058/03/001, 2012-2014, główny wykonawca.
- Technologie zmniejszania zagrożenia wywołanego niekontrolowanym uwalnianiem substancji niebezpiecznych, Nr O R00 0048 12, 2010r., projekt badawczo-rozwojowy, Lider Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodzi, wykonawca.
- Projekt w ramach programu „Patent Plus – wsparcie patentowania wynalazków”, „Konstrukcja i technologia wykonania spektrometrów ruchliwości jonów”, kierownik projektu.
- Mobilne laboratorium do badania systemów sygnalizacji skażeń, O ROB 0059 001, 2012-2014, główny wykonawca.
- Opracowanie instrumentalnych metod pomiaru, budowa i badania prototypów optoelektronicznych urządzeń do szybkiego oznaczenia niezamierzonego przenoszenia środków chemicznych stosowanych przy opryskach roślin uprawnych, Projekt rozwojowy: Nr R14 020 03, 2007 r., główny wykonawca.
- Miniaturowy czujnik zagrożeń biologicznych do sygnalizatorów wykrywania skażeń, Projekt celowy: Nr 361/BO/B, 2007 r., kierownik projektu.
- Laboratorium do identyfikacji skażeń szczebla związku taktycznego, Nr O R00 0048 12 2010 r., główny wykonawca.

C) Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną

- 2014 - Nagroda II stopnia w II Konkursie na najlepszą pracę naukową i badawczą z obszaru obronności przyznana przez Kapitułę Konkursu za pracę badawczą nt.: „Zastosowanie układu FAIMS-IMS do detekcji skażeń chemicznych”.
- 2014 - Wyróżnienie za najlepszy patent lub wzór przemysłowy, chroniony prawem własności przemysłowej w II Konkursie na najlepszą pracę naukową i badawczą

z obszaru obronności przyznaną przez Kapitułę Konkursu za pracę badawczą nt.: „Zastosowanie układu FAIMS-IMS do detekcji skażeń chemicznych”.

- 2014 - Złoty Medal przyznany przez Międzynarodowe Jury XVII Międzynarodowego Salonu Wynalazków i Innowacyjnych Technologii „ARCHIMEDES 2014” w Moskwie, za wynalazek chroniony 9 patentami i dotyczący rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w Przyrządzie Rozpoznania Skażeń PRS-1 W.
- 2012 - Nagroda Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej za Przyrząd rozpoznania skażeń nowej generacji PRS-1 na XX Jubileuszowym Międzynarodowym Salonie Przemysłu Obronnego MSPO w Kielcach w 2012 r.
- 2011 - Pierwsza nagroda za referat na XX Międzynarodowej Konferencji Towarzystwa Spektrometrii Ruchliwości Jonów (ISIMS), Edynburg, Wielka Brytania.
- 2011 – Złoty Medal na Międzynarodowej Wystawie w Brukseli - Eureka 2011.
- 2011 – Złoty Medal na Międzynarodowej Warszawskiej Wystawie Innowacji – „IWIS 2011”.
- 2010 - Złoty Medal na Międzynarodowej Wystawie Wynalazczości w Brukseli, BrusselsINNOVA 2010.
- 2009 - Srebrny medal na Światowej Wystawie Innowacji - Seul.
- 2005 - Złoty medal z wyróżnieniem na 54 Światowej Wystawie Innowacji.
- 2004 - Wyróżnienie Honorową Nagrodą Rektora WAT.
- 2004 - Złoty medal na 53 Światowej Wystawie Innowacji.
- 2003 - Srebrny medal na 52 Światowej Wystawie Innowacji.

D) Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

- 24th International Conference on Ion Mobility Spectrometry - ISIMS Cordoba 2015 r. „Detection of volatile organic compounds with differential ion mobility spectrometry”.
- 23rd International Conference on Ion Mobility Spectrometry - ISIMS-Asheville 2014 r., Fast identification method of chemical warfare agents (CWA) with high concentration of interfering compounds by DMS spectrometer.
- Międzynarodowa Konferencja Naukowo–Techniczna pt.: „Ochrona człowieka i środowiska naturalnego przed skażeniami”, 2014 r. „Identyfikacja bojowych środków trujących przy pomocy technologii IMS-DMS”.
- I Konferencja naukowa pt. „Funkcjonowanie krajowego systemu wykrywania skażeń i alarmowania w świetle aktualnych zagrożeń skażeniami” WAT Warszawa, 2014 r. „Zastosowanie techniki różnicowej ruchliwości jonów w wykrywaniu substancji toksycznych”.
- Inżynieria Przyszłości, Konferencja Naukowo-Biznesowa, Inteligentne rozwiązania techniczne i organizacyjne dla przemysłu, Radom 2014 r., „Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów w zastosowaniu do analizy par i gazów”.

- XXI International Conference on Ion Mobility Spectrometry -ISIMS, Orlando, USA, 2012 r. „New IMS/DMS based instrument”.
- XX International Conference on Ion Mobility Spectrometry -ISIMS, Edynburg, Wielka Brytania 2011 r. „Ceramic DMS—type detector”.
- Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona człowieka i środowiska naturalnego przed skażeniami”, 2010 r. „Nowoczesne metody skażeń chemicznych”.
- II Międzynarodowa Konferencja Naukowa EpiMilitaris 2013 – Bioterroryzm.
- XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, EKOMILITARIS 2007 r.
- XVI Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Techniczna „EKOMILITARIS-2002”, Zakopane, 2002 r.

Maziejuk Mirosław.