

# Autoreferat

## 1. Imię i nazwisko

Ewa Pawelec

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

magisterium      Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytetu Jagiellońskiego, r. 1992, fizyka  
Tytuł pracy „Mieszanie czterech fal w plazmie”

promotor: prof. Karol Musioł

doktorat          Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytetu Jagiellońskiego, r. 1997, fizyka  
Tytuł rozprawy „Mieszanie czterech fal w plazmie łukowej”

promotor: prof. Karol Musioł

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Uniwersytet Jagielloński      asystent      1992-93

doktorant      1993-97

st. techniczne      1998

Uniwersytet Opolski      adiunkt      od 1999

## 4. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję monografię „Diagnostyka plazmy niskotemperaturowej metodami spektroskopii optycznej”, Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego, Opole 2014.

### 4.a Tło naukowe dokonania habilitacyjnego

Plazma niskotemperaturowa jest przedmiotem badań doświadczalnych, a także narzędziem szeroko wykorzystywanym do zastosowań technicznych i naukowych. Przykładem jej zastosowań w technice są na przykład reaktory chemiczne [1] czy silniki plazmowe [2], natomiast w badaniach podstawowych wykorzystuje się ją głównie do wzbudzenia atomów i jonów. Pozwala to badać strukturę subtelną i nadsubtelną atomowych i jonowych linii widmowych, wyznaczać ich prawdopodobieństwa przejść czy też parametry poszerzeń i przesunięć Starkowskich. Usprawnianie i rozwijanie plazm technicznych, a także prowadzenie badań podstawowych z jej wykorzystaniem uzależnione są od możliwości zbadania tak zwanego stanu plazmy. Badanie stanu plazmy określa się jako jej diagnostykę.

Dla pełnego opisanie stanu plazmy potrzebna jest znajomość gęstości różnych jej składników: atomów, molekuł, jonów atomowych i molekularnych, znajdujących się w różnych stanach energetycznych, ich prędkości, rozkładów energii kinetycznej, a także gęstości i rozkładu energii kinetycznej dla elektronów. Podawanie tak wielu danych jest niewygodne, dlatego do uproszczenia opisu próbuje się wykorzystywać parametry bardziej ogólne, z których można wyznaczyć pozostałe uży-

wając równań tak zwanego modelu plazmy. Jedną z bardzo użytecznych i szeroko wykorzystywanych wielkości ogólnych jest temperatura, której stosowalność wymaga spełnienia przez ośrodek warunków przynajmniej częściowej równowagi termicznej, będącej wynikiem skutecznej wymiany energii pomiędzy składnikami plazmy.

Konstrukcja modeli plazmy opiera się na istnieniu równowag szczegółowych, które opisane są między innymi w pracy przeglądowej van Mullena [3]. Równowagi szczegółowe zachodzą pomiędzy zachodzącymi w plazmie procesami, a procesami do nich odwrotnymi, takimi jak np. wzbudzenie i deekscytacja atomu, czy też jonizacja i rekombinacja. Jeżeli taka równowaga zachodzi, to wynikowy rozkład energii da się opisać jednym parametrem, zwanym temperaturą.

Podstawowe równowagi, to równowaga Plancka pomiędzy procesami emisji i absorpcji promieniowania, równowaga Maxwella wynikająca z wymiany energii przy zderzeniach elastycznych, równowaga Boltzmanna pomiędzy procesami wzbudzenia i deekscytacji, a także równowaga Sahy pomiędzy procesami jonizacji i rekombinacji. Każda z tych równowag opisana jest temperaturą. Temperatury te, w sytuacji kiedy występuje równowaga pomiędzy różnymi układami, mogą być sobie równe – plazma wtedy znajduje się w stanie równowagi termicznej – mogą także się od siebie różnić. Dla niewielkich odstępstw od stanu równowagi termicznej można jeszcze używać określenia temperatura, a plazmę w której występują takie niewielkie odstępstwa opisać modelem częściowej równowagi termicznej.

Diagnostyka plazmy polega na pomiarze niektórych parametrów plazmy oraz na wyznaczeniu innych z wykorzystaniem określonego modelu, zwłaszcza takich jak temperatura (temperatury), gęstości składników oraz ich rozkłady prędkości. Ważnym elementem diagnostyki jest sprawdzenie, czy plazma spełnia założenia wybranego do jej opisu modelu.

Diagnostykę plazmy można prowadzić różnymi metodami, wykorzystując na przykład tak zwane sondy elektrostatyczne. Bardzo szeroko stosowanymi metodami są jednak metody spektroskopowe, w tym spektroskopia optyczna. Wykorzystanie metod spektroskopii optycznej do diagnostyki plazmy opiera się na fakcie, że emiter lub absorber (atom, jon czy też molekula) znajdujący się w ośrodku ulega zaburzeniom ze strony tegoż ośrodka. W związku z tym jego parametry spektroskopowe, takie jak natężenie wysyłanego światła, ilość absorbowanego światła, a także rozkład widmowy współczynnika emisji lub absorpcji, odzwierciedlają stan ośrodka, w którym ten emiter się znajduje.

## **4.b Przedstawienie monografii**

Celem mojej monografii było przedstawienie metod wykorzystywania do diagnostyki plazmy wyników pomiarów spektroskopowych i zilustrowanie ich wynikami moich własnych badań naukowych. We współczesnej literaturze brakuje opracowań na temat zastosowania klasycznej i laserowej spektroskopii do diagnostyki plazmy niskotemperaturowej – podręcznik Griema [4] odnosi się praktycznie tylko do spektroskopii klasycznej, podręczniki na temat spektroskopii laserowej nie uwzględniają natomiast zastosowań do diagnostyki plazmy. Ostatnio wydana monografia Kunzego [5] ogranicza się głównie do plazmy wysokotemperaturowej (fuzyjnej). Uznałam więc, że taka poszerzona monografia bazująca m.in. na moich własnych wynikach badań może być cennym źródłem danych dla innych fizyków.

W pracy ograniczyłam się do analizy pomiarów należących do trzech rodzajów spektroskopii:

- klasycznej spektroskopii emisyjnej, w której mierzony jest całkowity współczynnik emisji linii widmowej oraz jego rozkład spektralny,
- spektroskopii absorpcyjnej, w której mierzony jest współczynnik absorpcji określonej linii widmowej oraz jego rozkład spektralny;
- spektroskopii metodą fluorescencji indukowanej laserowo (ang. Laser Induced Fluorescence), w której mierzy się natężenie światła wypromieniowanego przez wzbudzony laserem emiter (atom, jon lub molekułę). W przypadku fluorescencji indukowanej laserowo mierzony sygnał odzwierciedla wartość całkowitą oraz rozkład spektralny współczynnika absorpcji, dlatego analiza

wyników dla tej metody spektroskopii jest bardzo podobna do analizy wyników spektroskopii absorpcyjnej.

Tematem monografii jest spektroskopia plazmy niskotemperaturowej. Określenie „plazma niskotemperaturowa” jest w literaturze szeroko spotykane, natomiast może się odnosić do różnych typów plazmy. Samo określenie temperatury jest nieco mało precyzyjne, ponieważ zależy od typu równowagi panującej w plazmie, jednak zazwyczaj można określić temperaturę kinetyczną cząstek ciężkich oraz przybliżoną temperaturę kinetyczną elektronów, które jednakże mogą się różnić nawet o kilka rzędów wielkości. W mojej monografii stosuję określenie zgodne z [6], czyli „niskotemperaturowa” odnosi się więc do plazmy o temperaturze cząstek (zarówno ciężkich, jak i elektronów) w zakresie od temperatury pokojowej do kilkudziesięciu tysięcy kelwinów, co odpowiada średniej energii kinetycznej cząstek od ułamków elektronowolta do kilku elektronowoltów.

Przykłady diagnostyki prezentowane w monografii dotyczą następujących typów plazmy:

- wytwarzana w łuku elektrycznym stabilizowanym ścianą (tzw. łuk Maeckera [7]), jako przykład plazmy stacjonarnej, bliskiej równowadze termodynamicznej;

- niskociśnieniowa struga plazmowa, produkowana w stosunkowo wysokociśnieniowym łuku elektrycznym stabilizowanym wirem (wnętrze tego łuku nie jest obserwowane), rozprężająca się do środowiska o bardzo niskim ciśnieniu (rzędu kilku Pa), jako przykład plazmy o dużej prędkości i wyraźnych zaburzeniach równowagi termodynamicznej, także równowagi Maxwella;

- produkowana w silniku Halla, jako przykład strugi plazmy o dużej prędkości znajdującej się w zewnętrznym polu magnetycznym;

- produkowana przez wyładowanie częstości radiowej, jako przykład plazmy niskociśnieniowej i nierównowagowej;

- wyładowanie barierowe, jako przykład nierównowagowej, często również niskociśnieniowej, plazmy znajdującej się w zewnętrznym polu elektrycznym;

Monografia składa się z czterech rozdziałów.

## Modele plazmy

W pierwszej części monografii przedstawiam podstawowy opis modeli plazmy, zgodnie z klasyfikacją odstępstw od równowagi termicznej wg van der Mullen [3]. Opisuję rodzaje równowag szczegółowych, które muszą być spełnione by plazmę można było określić jako będącą w stanie równowagi termicznej, podaję także jakie odstępstwa od równowagi mogą się w różnych typach plazmy pojawić.

W tym rozdziale prezentuję następujące modele plazmy:

- model całkowitej i lokalnej równowagi termicznej (w skrócie CRT i LRT), dla których zakłada się, że istnieje jedna temperatura, zwana temperaturą plazmy. Modele takie mogą być stosowane głównie dla plazmy zdominowanej przez procesy zderzeniowe;

- model częściowej lokalnej równowagi termicznej (cLRT) który stosowany jest jeżeli w plazmie pojawiają się niewielkie odstępstwa od założeń równowagi termicznej. Często stosuje się określenie cLRT jako stanu plazmy, w której populacje poziomów wzbudzonych cząstek określone są prawem Boltzmana, ale populacja poziomu podstawowego już nie (np. [8]). W innych publikacjach jako cLRT określa się plazmę nieizotermiczną, tj. taką, w której temperatura elektronów różna jest od temperatury cząstek ciężkich (np. [3]);

- model koronowy, który stosuje się do plazmy w której zderzenia zachodzą tak rzadko, że depopulowanie za ich pomocą poziomu atomowego (czyli wzbudzenie i deekscytacja z poziomu) jest zaniedbywalne w stosunku do depopulacji radiacyjnej;

- model zderzeniowo-radiacyjny. Opisujące go równania tworzą skomplikowany układ bilansów populacji i depopulacji wielu poziomów, którego rozwiązanie uzależnione jest od przyjęcia wielu założeń upraszczających. Modele tego typu rozwiązywane są numerycznie (np [9]). Taki bardzo uproszczony model zderzeniowo-radiacyjny stosowałam do interpretacji odstępstw od równowagi w rejonie przyelektrodowym argonowej plazmy łukowej [10].

## **Metody otrzymywania danych pomiarowych za pomocą spektroskopii optycznej**

Rozdział drugi pracy zawiera opis metod spektroskopowych wykorzystywanych do przeprowadzania pomiarów widm emisyjnych i absorpcyjnych, oraz metod analizy danych otrzymywanych z różnego typu eksperymentów spektroskopowych.

Opisuję tam pokrótce oddziaływanie promieniowania z emiterem bądź absorberem. Jest to opis w ramach teorii półklasycznej, wystarczający by pokazać związki pomiędzy wielkościami mierzonymi w eksperymentach spektroskopowych z opisującymi emiter oraz promieniowanie.

Następnie zajmuję się jednym z podstawowych problemów, który pojawia się podczas analizy wyników spektroskopii emisyjnej i absorpcyjnej. Problem ten wynika z faktu, że metody te są nie-lokalne, to znaczy, że mierzony sygnał pochodzi z rozciągniętego rejonu plazmy. Dla spektroskopii emisyjnej jest to w przybliżeniu rejon wzdłuż osi optycznej układu pomiarowego, dla spektroskopii absorpcyjnej droga optyczna, którą przebywa absorbowane promieniowanie. Otrzymywany sygnał jest więc wielkością przeciętną po przebytej w plazmie drodze optycznej, co sprawia, że pochodzi od emiterów lub absorberów mogących znajdować się w diametralnie różnych warunkach. Wyznaczanie lokalnych wartości parametrów z tego rodzaju spektroskopii wymaga zastosowania matematycznych metod analizy wyników pomiaru, uwzględniających transport promieniowania w źródle plazmy. Najczęściej stosowaną metodą jest transformacja Abela, której założeniem jest, że źródło jest osiowo symetryczne.

Jednym z przykładów prezentowanych w tej części rozdziału, z którym spotkałam się przy pomiarach emisyjnych argonowej strugi plazmowej [11] jest plazma ekspandująca radialnie. Plazma taka jest osiowo symetryczna, ale rozkłady widmowe mierzonego sygnału nie pozwalają na otrzymanie poprawnych rozkładów spektralnych współczynnika emisji, z powodu prowadzenia pomiaru „z boku”, z czego wynika przesunięcie dopplerowskie obserwowanych widm, które nie jest osiowo symetryczne.

W rozdziale drugim opisuję także metody prowadzenia badań spektroskopowych, zwracając szczególną uwagę na problemy kalibracji pomiarów emisyjnych oraz kontroli przestrajania laserów w pomiarach spektroskopii laserowej. Prezentuję tam wyniki badań przeprowadzonych przez zespół, którego byłam członkiem, a dotyczących pomiarów w strudze argonowej [12], dla pokazania kalibracji pomiarów prowadzonych za pomocą lasera przestrajalnego.

## **Metody uzyskiwania parametrów plazmy z całkowitych współczynników emisji/absorpcji**

W rozdziale trzecim opisuję, na bazie własnych wyników badań, metody uzyskiwania parametrów plazmy z użyciem całkowitych (przeciętnych po długości fali) współczynników emisji lub absorpcji. Całkowity współczynnik emisji dla linii widmowej jest wprost proporcjonalny do lokalnej gęstości emiterów w stanie wzbudzonym mierzonego przejścia. Podobnie jest ze współczynnikiem absorpcji, który jest proporcjonalny do gęstości w stanie dolnym.

Parametry plazmy ze współczynników emisji lub absorpcji dla atomów, jonów i molekuł otrzymuje się wieloma metodami, zależnymi od przyjętego modelu plazmy. W tym rozdziale pokazuję jak można wyznaczyć temperaturę używając metod wykorzystujących różne założenia co do istniejącej równowagi termicznej w plazmie.

### ***Widma atomowe i jonowe***

W tej części prezentowane są metody otrzymywania parametrów plazmy z wyników pomiaru całkowitych współczynników emisji atomów i jonów. Prezentuję tam metody, które można zastosować tylko dla plazmy w stanie lokalnej równowagi termicznej, jak metoda Larenza-Fowlera-Milnesa, czy wykres Olsena-Richtera, jak i metody wymagające mniej założeń, jak wykres Boltzman-na, którego wykorzystanie wymaga jedynie założenia o równowagowym obsadzeniu stanów

wzbudzonych, z których pochodzą mierzone przejścia optyczne.

Większość prezentowanych w tym podrozdziale przykładów pochodzi z przeprowadzonych ze współpracownikami pomiarów w łuku stabilizowanym ścianą, są to przede wszystkim pomiary temperatury [10, 13].

W dalszej części rozdziału wspominam także o metodach, w których wykorzystywane są modele nierównowagowe, prezentując jako przykład wyniki pomiarów w plazmie helowej w źródle wzbudzonym częstotliwością radiową [14]. Pokazuję tam, jak w zależności od parametrów źródła zmieniają się natężenia singletowych i trypletowych linii helu, a także natężenia atomowych i jonowych linii argonu. Za pomocą modelu zderzeniowo-radiacyjnego także dla takich widm można szacować temperaturę elektronową i gęstość elektronów, przy znajomości określonych współczynników opisujących wzbudzenia.

### **Widma molekularne**

W przypadku pasma molekularnego z jego analizy można otrzymać następujące wielkości:

- temperaturę wzbudzeniową, opisującą rozkład populacji na poziomach elektronowych, zbliżoną do temperatury elektronowej;
- temperaturę oscylacyjną, opisującą rozkład populacji na poziomach oscylacyjnych w ramach jednego stanu elektronowego, mającą wpływ na zachodzące reakcje chemiczne;
- temperaturę rotacyjną, opisującą rozkład populacji na poziomach rotacyjnych w ramach jednego poziomu oscylacyjnego, zbliżoną do temperatury translacyjnej cząstek ciężkich.

Prezentuję tu wyniki moich pomiarów pasm molekularnych prowadzonych przede wszystkim w zewnętrznych warstwach łuku elektrycznego. Przedstawiam także proponowaną przeze mnie metodę wyznaczania temperatury z widma zjonizowanej molekuly azotu, dla której w określonym zakresie widmowym zachodzi przesunięcie linii elektronowo-oscyłacyjno-rotacyjnych [15], związane z zaburzeniem jednego z poziomów, między którymi zachodzi przejście. Przesunięcie to pozwala na wyznaczenie całkowitych współczynników emisji dla tych linii w przypadku widma zmierzonego ze stosunkowo małą rozdzielczością i obliczenie ze stosunku tych współczynników emisji temperatury badanego źródła plazmowego. Jest to metoda szybka i wygodna, wymaga jednak uwzględnienia faktu, że współczynniki Einsteina dla linii zaburzonych różnią się od obliczonych na drodze teoretycznej. W monografii podaję te współczynniki, zmierzone w łuku argonowo-helowo-azotowym [16].

### **Metody uzyskiwania parametrów plazmy z rozkładów widmowych współczynników emisji/absorpcji**

W rozdziale czwartym opisuję wyznaczanie parametrów plazmy z analizy profilu linii widmowej, czyli rozkładu spektralnego współczynnika absorpcji lub emisji. Na profil linii widmowej wpływają następujące efekty:

- rozszczępienie poziomów energetycznych, spowodowane przez stacjonarne zewnętrzne pola elektryczne i magnetyczne;
- przesunięcie poziomów energetycznych, spowodowane przez zderzenia z cząstkami obojętymi lub naładowanymi;
- zmiana czasu życia poziomu oraz zmiana czasu zaniku koherencji poziomu, spowodowane zderzeniami z cząstkami obojętymi bądź naładowanymi;
- przesunięcia dopplerowskie związane z ruchem badanych emiterów lub absorberów (może to być prędkość termiczna, może także być ogólna prędkość przepływu plazmy);
- parametry eksperymentu: dla spektroskopii emisyjnej tak zwany profil aparaturowy, dla spektroskopii laserowej rozkład widmowy linii laserowej oraz tak zwane nasycenie mocą.

## **Poszerzenie linii widmowych**

Poszerzenia linii widmowych to przede wszystkim: dopplerowskie, wynikające z ruchów termicznych badanych cząstek, albo różne rodzaje poszerzenia ciśnieniowego. Z poszerzeń ciśnieniowych koncentrują się przede wszystkim na poszerzeniu starkowskim, związanym z oddziaływaniem badanego emitera z naładowanymi cząstkami w plazmie.

Pomiar temperatury dopplerowskiej pokazuję na przykładzie wyników otrzymanych m.in. przeze mnie podczas pomiarów w ekspandującej strudze hipernaddźwiękowej. Opisuję, jak z linii poszerzonej dopplerowsko można wyznaczyć temperaturę kinetyczną cząstek ciężkich, w tym przypadku atomów argonu lub tlenu (eksperymenty te szerzej opisane są w publikacjach [12] oraz [17]).

Poszerzenie linii widmowych można także zarejestrować za pomocą pomiarów emisyjnych. W tej części monografii pokazuję metodę, za pomocą której można wykorzystać mierzone sygnały do sprawdzenia poprawności teoretycznego modelu plazmy, zwłaszcza dla reabsorbowanych linii widmowych.

Do diagnostyki plazmy często wykorzystywane jest też poszerzenie starkowskie, z którego można wyznaczyć gęstość elektronów w plazmie. Prezentuję informacje na temat podstawowych linii używanych do diagnostyki, przede wszystkim linii wodoru. Porównuję wartości gęstości elektronów wyznaczone przeze mnie w łuku Maeckera z poszerzenia linii wodoru oraz z poszerzenia linii argonu.

## **Przesunięcie i rozszczepienie linii widmowej**

Obserwowane przesunięcia i rozszczepienia linii widmowych są wynikiem:

- ruchu plazmy jako całości (przesunięcie dopplerowskie);
- działania zewnętrznych pól elektrycznych i magnetycznych (rozszczepienie starkowskie i zeemanowskie).

Jako pierwsze prezentuję wyniki pomiarów w hipernaddźwiękowej argonowej strudze plazmowej, gdzie wykonany był pomiar przesunięcia dopplerowskiego argonowej linii widmowej metodą fluorescencji indukowanej laserowo. Ponieważ przesunięcie dopplerowskie jest wyraźnie większe od poszerzenia dopplerowskiego, a profil linii opisany jest profilem dopplerowskim, pomiar prędkości przepływu jest dla tej plazmy dość prosty.

Znacznie bardziej skomplikowana jest – prezentowana jako przykład linii rozszczepionej zeemanowsko – analiza dla plazmy ksenonowej w silniku Halla. Pomiaru te zostały wykonane również metodą fluorescencji indukowanej laserowo. Ponieważ użyty ksenon jest mieszkanką wielu izotopów, z których dwa wykazują strukturę nadsubtelną, to profile analizowanych przeze mnie linii wykazywały wpływ następujących czynników:

- struktury nadsubtelnej oraz przesunięcia izotopowego dla różnych izotopów ksenonu;
- przesunięcia dopplerowskiego pochodzącego od ruchu frakcji atomowej w tej plazmie;
- poszerzenia dopplerowskiego;
- rozszczepienia struktury nadsubtelnej przez zjawisko Zeemana;
- poszerzenia mocą związanego z nasyceniem badanego przejścia przez wiązkę laserową.

Wydawałoby się, że analiza takiego profilu wprowadza dużo wolnych parametrów, natomiast okazuje się, że mierzony profil jest tak bogaty w informacje, że dopasowanie syntetycznego profilu daje całkiem dokładne wyniki, zarówno dla ogólnej prędkości atomów, jak i dla ich temperatury kinetycznej oraz dla wartości indukcji pola magnetycznego.

Dla pełnej informacji czytelnika prezentuję także metody wyznaczania pola elektrycznego w plazmie za pomocą pomiaru rozszczepienia starkowskiego, natomiast przykłady te wzięte są z literatury.

## **Podsumowanie**

Monografia zawiera wiele opublikowanych, jak i nieopublikowanych wyników pomiarów dla

różnych źródeł plazmowych. Prezentuje ona wyniki pomiarów przeprowadzonych przeze mnie bezpośrednio, a także wyniki pomiarów których analizę prowadziłam. Z pomiarów tych zostały wyznaczone parametry plazmy w wielu szeroko stosowanych źródłach plazmowych. Przeprowadzana w tych źródłach diagnostyka plazmy pozwalała na badanie i rozwijanie źródeł plazmowych stosowanych zarówno w nauce, jak i jako źródła techniczne.

Prezentowane w monografii metody otrzymywania i analizy danych nie ograniczają się jednak do tych określonych przykładów, mogą także być stosowane w badaniach innych źródeł plazmowych. Na przykładzie własnych wyników prezentuję m.in. trudności eksperymentalne i analityczne, a także metody ich przewycięzania.

## Literatura

1. R.Engeln, S.Mazouffre, P.Vankan, I.Bakker, D.C.Schram, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, (2002) A100
2. S.Mazouffre, G.Bourgeois, L.Garrigues, E.Pawelec, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** (2011) 105203 (8pp)
3. J.van der Mullen, *Physics Reports* **191**, (1990) 109–220
4. H.R.Griem, *Principles of plasma spectroscopy*, Cambridge Univ Pr (2005)
5. H.Kunze, *Introduction to plasma spectroscopy*, Springer, Berlin–Heidelberg (2009)
6. V.N.Ochkin, *Spectroscopy of low temperature plasma*, Wiley-VCH ; Weinheim–Chichester (2009)
7. H.Maecker, *Zeitschrift fur Physik* **141**, (1955) 198–216
8. T.Wujec, *Spektroskopowa diagnostyka plazmy lukowej i wyladowania barierowego oraz pomiar stalych atomowych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego, Opole (2005)
9. H.P.Summers, W.J.Dickson, M.G.O’Mullane, N.R.Badnell , A.D.Whiteford, D.H.Brooks, J.Lang, S.D.Loch, D.C.Griffin, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **48**, (2006) 263–293
10. B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec, J.Chapelle, *J.Phys.D: Applied Phys* **29**, (1996) 2644-2649
11. E.Pawelec, V.Caubet-Hilloutou, S.Mazouffre, *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** (2007) 635-642
12. S.Mazouffre, V.Caubet-Hilloutou, J.C.Lengrand, E.Pawelec, *Phys. Plasmas* **12** (2005) 012323
13. S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, E.Pawelec, F.Richard, J.M.Cormier, J.Chapelle, *High Temp. Mat. Proc.* **1** (1997) 249-261
14. E.Pawelec, S.Mazouffre, P.Ortwein, *Proceedings of International Conference on Plasma Diagnostics*, Pont-a-Mousson, France, (2010)
15. E.Pawelec, *Eur. Phys. J. Special Topics* **144** (2007), 227-231
16. E.Pawelec, *Proceedings of EGAS Conference*, Gdańsk (2009)
17. S.Mazouffre, E.Pawelec, *J. Phys D* **42**, 015203 (2009)

*E. Pawelec*

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

### 5.a Przed doktoratem

Po studiach pracowałam przez rok jako asystent w Zakładzie Optyki Atomowej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, po czym zdałam tam egzamin na studia doktoranckie. Głównym tematem moich badań było mieszanie czterech fal: w przypadku magisterium w płomieniu sodowym, w przypadku doktoratu – w plazmie.

Mieszanie czterech fal jest nieliniowym efektem optycznym pojawiającym się we wszystkich rodzajach ośrodków dla dostatecznie silnego pola wzbudzającego. Trzy wiązki wprowadzone do ośrodka oddziałują ze sobą, tworząc czwartą wiązkę sygnałową o parametrach określonych przez ośrodek i wprowadzone wiązki. Jest to proces rezonansowy, którego wydajność znacznie wzrasta dla częstości odpowiadającej przejściu atomowemu. Można dowieść, że natężenie wiązki sygnałowej jest proporcjonalne do różnicy obsadzeń na poziomach energetycznych atomu. Daje to możliwość wykorzystania mieszania czterech fal do diagnostyki plazmy.

W ramach powyższych prac zajmowałam się badaniami eksperymentalnymi oraz analizą danych pomiarowych. W ramach eksperymentu między innymi budowałam i dostrajałam wykorzystywany w nim laser barwnikowy, ustawiałam układ optyczny do badań i razem ze współpracownikami rejestrowałam wyniki. Wyniki tej pracy opublikowane są w pracach [A6, A10, A11, A13, B15, B16].

Problem mieszania czterech fal rozpatrywałam także od strony teoretycznej. Obliczyłam natężenia i zależności spektralne dla wiązki sygnałowej wynikającej z mieszania czterech fal w gęstych ośrodkach. Wyniki tych obliczeń zamieszczone są w publikacji [A4].

Uczestniczyłam także w badaniach prowadzonych metodami klasycznej spektroskopii emisyjnej. Moim zadaniem podczas nich było głównie przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu, a w niektórych przypadkach także późniejsza analiza danych. Podczas stażu w Université d'Orleans wykonywałam diagnostykę dwóch źródeł plazmowych – tak zwanego *gliding arc* [A2] oraz wyładowania barierowego, określanego wówczas jako plazma „ferroelektryczna” [A3]. Badania te prowadzone były metodami spektroskopii molekularnej i prowadziły do pomiaru temperatury rotacyjnej i oscylacyjnej w plazmie zawierającej azot. Pokazały one, że dla obu tych źródeł występują silne odstępstwa od równowagi termicznej, a temperatury rotacyjna i oscylacyjna bardzo się różnią. Były to jedne z pierwszych badań pokazujących tak silną nierównowagę termiczną dla źródeł plazmowych pod ciśnieniem atmosferycznym.

W ramach badań w Zakładzie Optyki Atomowej IF UJ uczestniczyłam także w badaniu obszarów przykatodowych łuku elektrycznego stabilizowanego ścianą (prace [A1, A5, A8, A12, A14]). W ramach tych badań prowadziłam eksperymenty metodami spektroskopii klasycznej oraz wykonywałam obliczenia. Rejon przykatodowy łuku stabilizowanego ścianą wykazuje wyraźne odstępstwa od równowagi termicznej, związane, jak to zostało pokazane w pracach [A1] i [A5], z dostarczaniem w okolicy katody chłodnego gazu.

### 5.b Po doktoracie

#### Pomiar prawdopodobieństw przejść w neutralnym fluorze [B1]

Jeszcze przed obroną doktoratu wyjechałam na staż do National Institute of Standards and Technology (NIST), w Gaithersburg, Maryland (USA), ale wyniki prowadzonych tam badań zostały do końca opracowane i opublikowane dopiero po moim doktoracie. Prowadzone w NIST badania dotyczyły prawdopodobieństw przejść w neutralnym fluorze. Zmierzyłam tam względne natężenia linii fluoru z dwóch macierzy przejścia – 3s-3p, dla której pewne dane były już wcześniej zmierzone oraz zupełnie nowe – z macierzy przejścia 3p-3d, ogólnie około 100 linii widmowych. Wyniki



pokazały wyraźne odstępstwa od sprzężenia L-S, zwłaszcza dla macierzy 3p-3d.

Do celu pomiaru linii fluoru używany był łuk stabilizowany ścianą, pracujący głównie w atmosferze helu. Łuk został tak zmodyfikowany, aby plazma silnie podgrzewała grubą teflonową przekładkę, wyzwalając z niej potrzebny do pomiarów fluor [A7]. W tym eksperymencie wykonywałam pomiary natężeń linii fluorowych oraz obliczałam ich względne i bezwzględne natężenia.

## **Modelowanie parametrów łuku elektrycznego [B2, B14, B15, B18]**

W ramach stażu podoktorskiego prowadziłam modelowanie łuku elektrycznego w Laboratoire National d'Hydraulique, EDF, w Chatou pod Paryżem. Zastosowanie równań magnetohydrodynamicznych do modelowania plazmy wymaga uwzględnienia tak zwanych współczynników materiałowych, takich jak na przykład gęstość plazmy, jej przewodnictwo termiczne i elektryczne. Zmierzanie współczynników materiałowych jest bardzo trudne, dlatego głównie wyznaczone są z obliczeń modelowych. Do ich obliczenia należy zastosować określone założenia co do stanu plazmy – zazwyczaj liczone są przy założeniu, że plazma znajduje się w stanie lokalnej równowagi termicznej. Przy obliczeniach przeze mnie podczas pracy w Laboratoire National d'Hydraulique wartości współczynników materiałowych uwzględniałam także nadpopulację stanu podstawowego. Współczynniki te zostały przeze mnie użyte do obliczenia rozkładu parametrów w łuku argonowym stabilizowanym ścianą, przy czym najdokładniejsze obliczenia prowadzone były dla szczególnie interesującego rejonu przykatodowego tej plazmy.

## **Pomiary parametrów strug plazmowych [B4, B7, B8, B21, B22, B23, B24, B27]**

W latach 2002–2007 wielokrotnie wyjeżdżałam na kilkumiesięczne pobyty w Laboratoire d'Aerothermique (późniejsza nazwa ICARE), CNRS. Podczas tych pobytów zajmowałam się pomiarami parametrów strug plazmowych. Ideą eksperymentu było przygotowanie plazmowego tunelu aerodynamicznego do symulowania warunków wejścia sondy kosmicznej w atmosfery planetarne, dlatego docelowymi gazami roboczymi były gazy spotykane w atmosferach planet i księżyców, takie jak CO<sub>2</sub> [B8] oraz azot. Do wstępnego zbadania i optymalizacji strugi użyty został argon [B4, B7]. Eksperymenty prowadzone były metodą fluorescencji indukowanej laserowo oraz spektroskopii emisyjnej, a wyniki z nich otrzymane porównywane były ze sobą dla lepszego zrozumienia zachodzących w strudze procesów. Wyznaczanymi parametrami była temperatura cząstek ciężkich oraz prędkość plazmy jako całości.

Przy opisanych tu eksperymentach moją rolą było przygotowanie układu optycznego, prowadzenie eksperymentów razem ze współpracownikami i późniejsza analiza danych pomiarowych (wyznaczanie temperatury i prędkości plazmy). Całkowicie moim dziełem była analiza wyników spektroskopii emisyjnej [B7], przy której wyjaśniłam przyczynę kształtów obserwowanych linii widmowych i pokazałam, że taki rodzaj emisji jest zgodny z parametrami plazmy wyznaczonymi innymi metodami.

## **Pomiary niejednorodności i efektu odmieszania w plazmie łukowej [B3, B5, B12, B13, B19, B20, B25, B28, B31]**

Ważnym i często wykorzystywanym założeniem dotyczącym plazmy wytwarzanej w łuku Maeckera jest jej jednorodność wzdłuż kanału plazmowego. Badania prowadzone przeze mnie i współpracowników w laboratorium w Opolu miały na celu sprawdzenie tego założenia, a także opis efektu odmieszania w plazmie wieloskładnikowej. Efekt odmieszania polega na tym, że w wyniku różnych mechanizmów stosunek wagowy gazów w różnych rejonach plazmy różni się od stosunku wagowego gazów wprowadzanych do plazmy.

W tej serii doświadczeń wyznaczone były następujące parametry plazmy: temperatura, stosunki wagowe dla pierwiastków wprowadzanych do plazmy oraz gęstość elektronów. Eksperymenty prowadzone były metodami spektroskopii emisyjnej, głównie przy obserwacji łuku z boku (*side-*

on), a natężenia i profile linii otrzymywane były metodą transformacji Abela. Analiza danych wymagała niejednokrotnie sprawdzenia stosowanego modelu plazmy, ponieważ zwłaszcza dla plazmy zawierającej hel odstępstwa od równowagi mogły być istotne. Głównie przyjmowane było założenie o lokalnej równowadze termicznej lub częściowej lokalnej równowadze termicznej, przy której uwzględniane były nadpopulacje poziomów atomowych (podstawowego lub metastabilnych).

Eksperymenty były przeprowadzane w plazmie zawierającej argon, azot, wodór, a także mieszanek helu z argonem i azotem. Wynikiem eksperymentów było między innymi wykazanie, które rejony i dla jakich mieszanin gazów można traktować jako w przybliżeniu jednorodnie wzdłuż kolumny plazmowej, a dla których założenie jednorodności nie jest spełnione [B3]. Bardzo ważnym wynikiem było pokazanie, że dla niektórych mieszanin gazów gęstość elektronów nie jest jednako- wa wzdłuż kolumny plazmowej [B5], co może silnie wpływać na wyniki pomiarów parametrów Starkowskich w takiej plazmie.

Niektóre z tych eksperymentów prowadziłam całkiem samodzielnie, inne ze współpracowni- kiem. Opracowywałam wyniki oraz obliczałam teoretyczne wartości parametrów plazmy dla róż- nych mieszanin gazów.

## **Zastosowanie widma molekuly $N_2^+$ do diagnostyki plazmy [B6, B29]**

Podczas prac w Opolu stosowałam do diagnostyki plazmy także linie i pasma molekularne. Stosowanie nierozdzielonych pasm molekularnych do diagnostyki plazmy jest dość powszechne (np. [A2, A3]). Można z nich wyznaczyć temperaturę rotacyjną molekuly, która w większości wy- padków może być przyjęta za równą temperaturze cząstek ciężkich w plazmie. Jeżeli jednak pasmo molekularne zmierzone jest z dostateczną rozdzielczością, można zmierzyć natężenia poszczegól- nych linii elektronowo-oscylacyjno-rotacyjnych i wyznaczyć temperaturę używając wykresu Boltz- manna, co jest znacznie dokładniejsze.

W przypadku często obserwowanego w plazmach widma molekuly  $N_2^+$ , a dokładniej pasm z tak zwanego systemu pierwszego ujemnego (przejście  $B^2\Sigma_u^+$  na  $X^2\Sigma_g^+$ ), nisko wzbudzone linie z gałęzi R pasma oraz wysoko wzbudzone linie z gałęzi P praktycznie nakładają się na siebie, co sprawia, że kształt pasma nierozdzielonego słabo zależy od temperatury powyżej 5000K. Pasma zmierzone z dostateczną rozdzielczością, tak by linie z gałęzi P i R dało się rozdzielić, może być stosowane także do pomiarów wyższych temperatur rotacyjnych. Istnieje pewna grupa linii z gałęzi P, które są przesunięte z racji oddziaływania ich górnych poziomów z wysoko wzbudzonymi pozio- mami rotacyjnymi poziomu  $A^2\Pi_u$ . Linie te są więc bardziej oddalone od sąsiadujących linii z gałęzi R, i przez to mogą być wykorzystane do wyznaczenia temperatury rotacyjnej nawet gdy widmo jest mierzone z niedostateczną dla rozdzielenia innych linii z gałęzi R i P rozdzielczością. Jako dowód przedstawione jest porównanie temperatury wyznaczonej ze stosunku natężeń jednej z przesunię- tych linii z gałęzi P oraz sąsiadującej linii z gałęzi R oraz temperatury wyznaczonej z pełnego wy- kresu Boltzmann dla szesnastu linii rotacyjnych.

Ta publikacja jest całkowicie mojego autorstwa.

## **Pomiar rozszczepienia nadsubtelnego linii ksenonu [B9, B26]**

Podczas pobytu w ICARE, CNRS, brałam także udział w pomiarach parametrów nadsubtel- nych linii ksenonu. Znajomość tych wielkości jest przydatna zarówno do sprawdzenia obliczeń kwantowomechanicznych, jak i do diagnostyki plazmy metodą analizy profilu linii widmowej. W tej serii eksperymentów zmierzone zostały profile dwóch linii atomowych ksenonu, o długościach fali 828,01 nm oraz 834,68 nm oraz jednej linii jonowej, o długości fali 834,72 nm. Pomiaru linii atomowych były przeprowadzane metodą laserowej spektroskopii nasyceniowej, natomiast pomiaru linii jonowej metodą fluorescencji indukowanej laserowo oraz nasycionej fluorescencji indukowanej laserowo. Wyznaczone zostały współczynniki struktury nadsubtelnej dla poziomów obu izotopów nieparzystych ksenonu. Wyniki dla poziomów atomowych zostały

porównane z wynikami innych eksperymentów, natomiast wyniki dla jonu były pierwszymi pomiarami doświadczalnymi dla poziomu  $5d [4]_{7/2}$ .

W tym eksperymencie przygotowywałam i prowadziłam doświadczenia, obliczałam współczynniki nadsubtelne oraz przygotowałam tekst i ilustracje do publikacji.

### **Wyznaczanie parametrów silnika Halla [B10]**

Podczas pobytu w ICARE, CNRS w 2009 roku uczestniczyłam także w pomiarach parametrów ksenonowego silnika Halla. Interesującymi parametrami są prędkość i temperatura znajdujących się wewnątrz silnika Halla atomów ksenonu. Pomiary prowadzone były metodą fluorescencji indukowanej laserowo, a mierzone było przejście widmowe między poziomami  $6s [1/2]_2$  oraz  $6p [3/2]_2$  o długości fali 834,6822 nm. Dolny poziom tego przejścia jest poziomem metastabilnym, co z jednej strony dawało możliwość prowadzenia pomiarów nawet w pewnej odległości od rejonu generowania plazmy, z drugiej strony sprawiało, że obserwowany profil wykazywał wyraźne poszerzenie mocą lasera.

Okazało się, że dla rejonów oddalonych od kanału plazmowego w profilu obserwowanej linii można było zauważyć wpływ dwóch grup atomów o różniącej się temperaturze i prędkości. Wyznaczona z eksperymentu prędkość atomów została porównana z obliczeniami modelowymi, w których sprawdzano konieczność uwzględnienia w modelu silnika zderzeń cząstek z wymianą ładunku, nierównowagowych efektów przy wymianie energii między cząstkami plazmy, a ścianą silnika, a także resztkowego ciśnienia gazu na zewnątrz silnika plazmowego.

W tym eksperymencie zajmowałam się analizą danych pomiarowych, wyznaczeniem temperatury oraz prędkości plazmy oraz uwzględnieniem w profilach linii rozszczepienia zeemanowskiego.

## Spis publikacji

### Przed doktoratem:

Prace opublikowane w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR):

- A1. B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, **E.Pawelec**, J.Chapelle: *Spectroscopic investigation of equilibrium state in electric arc cathode region*, J.Phys.D: Applied Phys **29**, (1996) 2644-2649
- A2. A.Czernichowski, H.Nassar, A.Ranaivosoloarimanana, A.A.Fridman, M.Simek, K.Musiol, **E.Pawelec**, L.Dittrichova: *Spectral and electrical diagnostics of the gliding arc*, Acta Phys. Pol. A, **89**, (1996) 595-603
- A3. **E.Pawelec**, M.Simek, H.Nassar, A.Czernichowski, K.Musiol, L.Dittrichova, *Temperature measurements in non-equilibrium "ferroelectric" plasma*, Acta Phys. Pol. A, **89**, (1996) 503-507
- A4. **E.Pawelec**, B.Samson, W.Gawlik, K.Musiol: *Resonant Degenerate Four-Wave Mixing in dense media*, Phys. Rev A, **54**, (1996) 913-919
- A5. S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, **E.Pawelec**, F.Richard, J.M.Cormier, J.Chapelle: *Description of some phenomena in electric arc cathode region*, High Temp.Mat.Proc. **1** (1997) 249-261
- A6. K.Musiol, K.Dzierżęga, **E.Pawelec**, B.Pokrzywka, S.Pellerin, S.Labuz: *Degenerate Four-Wave Mixing in equilibrium argon arc plasma*, J.Phys.D, **30**, (1997) 3346-3352

Publikacje nie indeksowane:

- A7. J.Musielok, **E.Pawelec** *A new method for excitation of FI spectrum in a wall-stabilized arc* ESCAMPIG 1996, EPS Abstracts Vol. 20E, Part B, 437, Poprad 1996.
- A8. B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, **E.Pawelec**, J.Chapelle *Spectroscopic study of electric arc cathode region* 4<sup>o</sup> European Conf. on Thermal Plasma Processes - Athene (Grece) - 15/17 July 1996
- A9. S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, **E.Pawelec**, J.Chapelle *Study of electric arc cathode region* 4<sup>o</sup> Colloque sur la Dynamique des Ions, des Atomes et des Molécules - Bourges (France) - 16/18 July 1996 [Vol.I, p.P91]
- A10. Ł.Bratasz, K.Dzierżęga, K.Musioł, **E.Pawelec**, S.Pellerin, B.Pokrzywka: *Plasma diagnostics by phase-conjugate degenerate four-wave mixing* Int. Symp. PLASMA'97, Jarnołtówek June 10-12, 1997, Conf. Proc. Ed. By M. Sadowski, H. Rothkaehl, Warszawa 1997
- A11. Ł.Bratasz, K.Dzierżęga, K.Musioł, **E.Pawelec**, S.Pellerin, B.Pokrzywka: *Non-thermal plasma diagnostics by phase-conjugate degenerate four-wave mixing* 29th EGAS Conference, 15-18.07.1997, Berlin, Conf. Proc. Ed. By H.-D. Kronfeldt, Berlin 1997
- A12. B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, **E.Pawelec**, J.-M.Cormier, J.Chapelle: *Phenomena in the electric arc cathode region* 23rd Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases - Toulouse (France) - 17/22 July 1997 [Vol.II, pp.122-123]
- A13. K.Musiol, K.Dzierżęga, **E.Pawelec**, B.Pokrzywka, S.Pellerin, J.Chapelle: *Diagnostic des milieux hors d'équilibre - II. Mélange quatre ondes* proceedings of 1<sup>o</sup> Séminaire Franco-Polonais sur les Plasmas Thermiques dans l'Espace et en Laboratoire - Warszawa - 08/10 December 1997
- A14. B.Pokrzywka, K.Musiol, K.Dzierżęga, **E.Pawelec**, S.Pellerin, J.Chapelle: *Etude de la zone cathodique d'un arc électrique* proceedings of 1<sup>o</sup> Séminaire Franco-Polonais sur les Plasmas Thermiques dans l'Espace et en Laboratoire - Warszawa 1997

## Po doktoracie:

Prace opublikowane w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR):

- B1. J.Musielok, **E.Pawelec**, U.Griessman, W.L.Wiese: *Atomic transition probabilities of FI spectral lines from 3s – 3p and 3p – 3d transition arrays*, Phys. Rev. A **60** (1999) 947-955
- B2. **E.Pawelec**, B.Pokrzywka, C.Delalondre, S.Pellerin, J.Chapelle: *LTE modelisation of an argon transferred arc with orifice anode*, High Temp. Mat. Proc. **4** (2001) 229-242
- B3. I.Książek, **E.Pawelec**: *Study of uniformity of plasmas produced in a wall-stabilized arc*, Contrib. Plasma Phys. **43** (2003) 73-77
- B4. S.Mazouffre, V.Caubet-Hilloutou, J.C.Lengrand, **E.Pawelec**: *Examination of the shock wave regular reflexion phenomenon in a rarefied supersonic plasma flow*, Phys. Plasmas **12** (2005) 012323
- B5. **E.Pawelec**, I.Książek: *Radial and axial distributions of the electron density and temperature in a cascade arc plasma*, High Temp. Mat. Proc. **10** (2006), 33-38
- B6. **E.Pawelec**: *Estimation of the plasma temperature by using the resolved spectrum of  $N_2^+$* , Eur. Phys. J. Special Topics **144** (2007), 227-231
- B7. **E.Pawelec**, V.Caubet-Hilloutou, S.Mazouffre: *Fabry-Perot lineshape analysis in an optically thick expanding plasma*, Plasma Sources Sci. Technol. **16** (2007) 635-642
- B8. S.Mazouffre, **E.Pawelec**: *Metastable oxygen atom velocity and temperature in supersonic  $CO_2$  plasma expansions*, J. Phys D **42**, 015203 (2009)
- B9. **E.Pawelec**, S.Mazouffre, N.Sadeghi: *Hyperfine structure of some near-infrared Xe I and Xe II lines*, Spectrochimica Acta Part B **66** (2011) 470–475
- B10. S.Mazouffre, G.Bourgeois, L.Garrigues, **E.Pawelec**: *A comprehensive study on the atom flow in the cross-field discharge of a Hall thruster*, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 105203 (8pp)
- B11. **E.Pawelec**: *Diagnostics of Low Temperature Plasmas by Optical Means* Contrib. Plasma Phys. **51** (2011) 165–170
- B12. **E. Pawelec**: *Non-homogeneities in multi-element plasmas*, Nukleonika **57** (2012), 257-263
- B13. **E. Pawelec**: *Axial long and short range uniformity of the plasma in a wall-stabilized arc*, Physica Scripta, przyjęte do druku.

Publikacje nie indeksowane:

- B14. **E. Pawelec**, B. Pokrzywka, C. Delalondre, S. Pellerin, J. Chapelle, *Modele Hors Equilibre de la Region Cathodique d'un Arc Electrique dans l'Argon*, proceedings of II Seminarium Pol-Franc w Krakowie, lipiec 1999
- B15. B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, **E.Pawelec**, J.-M.Cormier, J.Chapelle: *Étude de la zone cathodique d'un arc électrique*, C.–R. Acad.Sci.Paris t.327, Série II.b (1999) 391–398
- B16. B.Pokrzywka, S.Pellerin, K.Musiol, K.Dzierzega, **E.Pawelec**, J.Chapelle: *Study of The Cathodic zone of an Electric Arc*, J.Tech.Phys **40** (1999) 51–59
- B17. K.Musiol, K.Dzierzega, **E.Pawelec**, B.Pokrzywka, S.Pellerin, S.Labuz: *Thermal Plasma Diagnostics Using Degenerate Four–Wave Mixing*, J.Tech.Phys **40** (1999) 89–96
- B18. **E.Pawelec**, C.Delalondre, C.De Izarra, O.Vallee: *Modelization of the Maecker Arc Burning in the Mixture of Argon and Nitrogen*, Europhysics Conference Abstracts of ECAMP 7, Vol. **25 B** Berlin 2001, p. 168
- B19. I.Książek, **E.Pawelec**: *Study of Uniformity of Plasmas Produced in a Wall-Stabilized Arc*, Conference Plasma 2001, Warszawa 2001, CD - proceedings
- B20. **E.Pawelec**, **I.Książek**: *Distributions Radiales et Axiales de la Densite Electronique dans un Arc Stabilise par Parois/Radialne i aksjalne rozkłady koncentracji elektronów w*

- kaskadowym palniku plazmowym*, proceedings of Troisieme Séminaire Franco-Polonais sur les Plasmas Thermiques dans l'Espace et en Laboratoire - Warszawa 2001
- B21. S.Mazouffre, V.Lago, M.Lino da Silva, M.Dudeck, **E.Pawelec**: *Plasma formation during high speed flights in upper layers of the Earth's atmosphere*, AIAA paper 2002-5272, (2002)
- B22. S.Mazouffre, V.Caubet-Hilloutou, M.Dudeck, **E.Pawelec**: *Operating characteristics of the SR5 hypersonic plasma wind-tunnel*, ESA Proceedings of the International Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry, Lisbon, Portugal 2003
- B23. S.Mazouffre, **E.Pawelec**, V.Caubet-Hilloutou, M.Dudeck: *Experimental investigation of the flow properties of rarefied hypersonic plasma jets. Fabry-Pérot interferometry and laser induced fluorescence*, AIAA paper 2003-3747 (2003)
- B24. **E.Pawelec**, S.Mazouffre, V.Caubet-Hilloutou, M.Dudeck: *Application of LIF to diagnostics of plasma jets*, CD - proceedings of 2nd German-Polish Conference on Plasma Diagnostics, Kraków, Sept. 2004
- B25. **E.Pawelec**, I.Książek: *Modeling and Measurements of the Arc Plasma in a mixture of gases*, AIP Conference Proceedings Volume 812, of the International Conference Plasma 2005 comb. with 3rd GPPD and the 5th FPS, Melville, New York (2006), 367-370
- B26. S.Mazouffre, **E.Pawelec**, N.Tran Bich, N.Sadeghi: *Doppler-free spectroscopy measurement of isotope shifts and hyperfine components of near-IR xenon and krypton transitions*, AIP proceedings of the International Conference Plasma 2005 comb. with 3rd GPPD and the 5th FPS, Melville, New York, (2006)
- B27. S.Mazouffre, **E.Pawelec**, *Metastable oxygen atom velocity and temperature in expanding CO<sub>2</sub> plasma jets*, Proceedings of the ICPIG 2007 conference, poster 4P06-08, CD
- B28. **E.Pawelec**: *Modeling and Measurements of the Demixing Effect In Arc Plasmas Containing Hydrogen*, AIP Conference Proceedings Volume 993, of the International Conference Plasma 2007, Melville, New York (2008), 333-336
- B29. **E.Pawelec**: *Perturbed molecular lines of N<sub>2</sub><sup>+</sup> for plasma diagnostics*, Proceedings of EGAS Conference, Gdańsk (2009)
- B30. **E.Pawelec**, S.Mazouffre, P.Ortwein: *Spectroscopic Investigation of a Low-Temperature Plasma in Magnetic Field*, Proceedings of International Conference on Plasma Diagnostics, Pont-a-Mousson, France, (2010)
- B31. **E.Pawelec**: *Nonuniformities along the plasma column in the helium-argon plasmas produced in a wall-stabilized arc*, Proceedings of IXth Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics (2011)

*E. Pawelec*