

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

85

WARSZAWA - POZNAŃ 1983

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK
KAZIMIERZ STELLER · ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY · CHAIRMAN)
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1983

Printed in Poland

ISBN 83-01-04191-9
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380+90 egz.	Oddano do składania 5 VII 1982 r.
Ark. wyd. 22. Ark. druk. 15	Podpisano do druku 4 III 1983 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w marcu 1983 r.
Nr zam. 440/179	N-5/1001.

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JÓZEF ŚMIGIELSKI

Działalność naukowa Zakładu Dynamiki Plazmy w latach 1976 - 1980

Отдел динамики плазмы

Основной областью исследований было воздействие электромагнитных полей на среду.

Группа магнитоплазмодинамики в основном занималась вопросами микроволн, а особенно их воздействием на газы. Изучения последних лет сосредотачивались прежде всего на физическом механизме сильного микроволнового разряда, в том особенно в пределах длительного разряда при низком давлении, поддерживаемого передвигающейся волной. Завершено раньше проводимые исследования тлеющего разряда в магнитном поле и развитие соответствующих диагностических методов.

Группа газовой электроники занималась исследованием электрического тлеющего разряда в лазерах, особенно в лазерах с полым катодом. Второй проблемой было развитие систем лазерно-доплеровской анемометрии. Определены также характеристики электрического тлеющего разряда в различных газах, с точки зрения технологических применений, как напр. ионовое азотирование.

Группа электромеханики разрабатывала некоторые новые идеи электрических преобразователей расхода жидкости и газа, а также разницы давлений. Наиполнее исследован расходомер. Другие идеи приборов подвергались только предварительным испытаниям.

Проводились также и уже завершены исследования электродуговых подогревателей. Обобщены их результаты и определены практические указания для проектирования.

Department of Plasma Dynamics

The principal field investigated was the interaction of electromagnetic fields with the matter.

The Group for Magneto-Plasma-Dynamics concentrated its activity in the field of microwaves and particularly their interaction with gases. The studies carried out in the last few years concerned mainly the physical mechanism of steady-state microwave discharges with the particular interest in long, low pressure discharges supported by a travelling wave. The prior investigations of glow discharge in magnetic field and development of the appropriate diagnostic methods have been concluded.

The Group for Gaseous Electronics investigated electrical glow discharges in lasers and particularly the performance of laser hollow-cathodes. The next problem was the development of laser Doppler anemometer systems. Additionally the characteristics of the electrical glow discharges in various gases were determined from the point of view of technological applications such as ion nitriding.

The Group for Electromechanics reported several new concepts of electric transducers of fluid flow rate and pressure difference. The most thoroughly investigated was the electromagnetic float flowmeter. Other concepts underwent only preliminary testing.

There has been also conducted and finished the investigation of electric arc heaters. The results have been generalized and utilized for formulation of design guiding rules.

1. Wprowadzenie ogólne

W Zakładzie Dynamiki Plazmy IMP PAN w latach 1976 - 80 prowadzono prace badawcze związane z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego z ośrodkami ciągłymi. Prace te obejmowały badania:

Pracownia Zespół	Wyszczególnienie zagadnień	Nr problemu i koordynator
Pracownia Magneto- dynamiki Plazmy	Fale jonizacji i dyfuzja w plazmie w polu magnetycznym	MR I.23 IPPT PAN
	Metody pomiarowe lokalnych parametrów plazmy	
	Procesy generacji plazmy przy użyciu mikrofal	
Pracownia Laserowych Technik Pomiarowo- -Badawczych	Anemometria laserowa	Probl. węzł. 06.3 Zjedn. OMEL
	Wyładowania elektryczne w mieszaninach gazów i par metali (lasery jonowe)	
	Wyładowanie elektryczne w azocie (azotowanie jonowe)	R I.2 Polit. Częstoch.
Zespół elektro-termo- mechaniki	Przetworniki elektryczne natężenia przepływu, ciśnienia i gęstości	MR I.26 IMP PAN
	Zjawiska elektrotermiczne w podgrzewaczach łukowych gazu z dyszą segmentową	C 1 IMP PAN

Ponadto wykonywano również prace teoretyczne i doświadczalne związane z laserami gazodynamicznymi i przepływowymi w ramach problemu MR I.23 koordynowanego przez IPPT PAN oraz w ramach problemu węzłowego 05.10 koordynowanego przez przedsiębiorstwo PROMOR. W roku 1980 15-osobowa grupa realizująca te prace uzyskała czasowy status samodzielnego zespołu. Ta zmiana organizacyjna miała na celu zwiększenie operatywności i usprawnienie działalności wymagającej kooperacji z różnymi wykonawcami zewnętrznymi. Odpowiednie wyniki badań przedstawiono szczegółowo w odrębnym sprawozdaniu.

W Zakładzie Dynamiki Plazmy do roku 1980 było zatrudnionych 37 pracowników a także 1 doktorant, zgrupowanych w 3 pracowniach:

- Magnetodynamiki Plazmy,
- Laserowych Technik Pomiarowo-Badawczych,
- Gazodynamiki Radiacyjnej.

Z pracowni Laserowych Technik Pomiarowo-Badawczych został wyodrębniony zespół elektrotermomechaniki rozwijający własną tematykę badań.

Wśród zatrudnionych było: 5 samodzielnych pracowników naukowo-badawczych, 6 doktorów, 19 pracowników z wykształceniem wyższym I i II stopnia, 8 techników-laborantów.

W okresie sprawozdawczym zostały zakończone: 2 przewody doktorskie, 1 przewód habilitacyjny.

Prace badawcze prowadzone w Zakładzie Dynamiki Plazmy objęte problemami węzłowymi, resortowymi i instytutowymi były w około 85% finansowane i kontrolowane przez

koordynatorów zewnętrznych. Zakład Dynamiki Plazmy realizował współpracę naukową z następującymi instytucjami zagranicznymi:

Instytut Fizyki im. Lebediewa	AN ZSRR	Moskwa
Instytut Wymiany Ciepła i Masy	AN ZSRR	Mińsk
Instytut Fizyki Ciepła	SO AN ZSRR	Nowosybirsk
Instytut Fizyki Plazmy	ČSAV	Praha
Instytut Fizyki	ČSAV	Praha
Instytut Fizyki Elektronowej	NAN	Berlin
Instytut Fizyki Ciała Stałego	BAN	Sofia
Instytut Elektroniki	BAN	Sofia

Rezultatem tej współpracy były wspólne badania i publikacje.

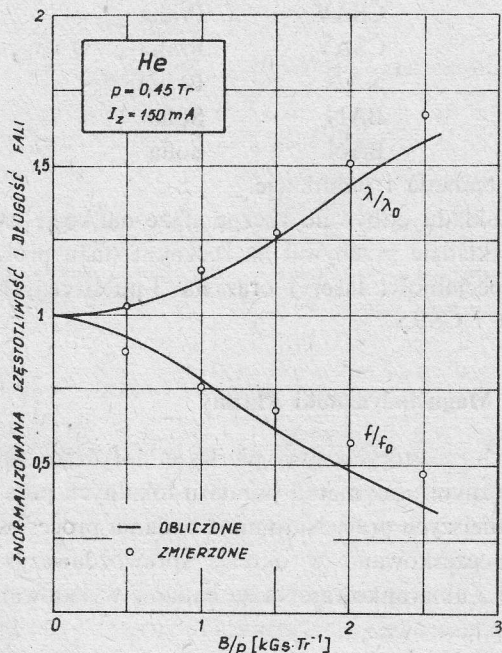
W latach 1976 - 80 kilku pracowników Zakładu odbywało roczne staże naukowe za granicą (1 ZSRR, 1 USA, 1 Kanada). W Zakładzie przebywał na rocznym stażu prof. K. Matsuura z Uniwersytetu Kanazawa (specjalność: lasery) oraz na 3-miesięcznych stażach 4 pracowników naukowych z ZSRR i ČSRS.

2. Wyniki badań Pracowni Magnetodynamiki Plazmy

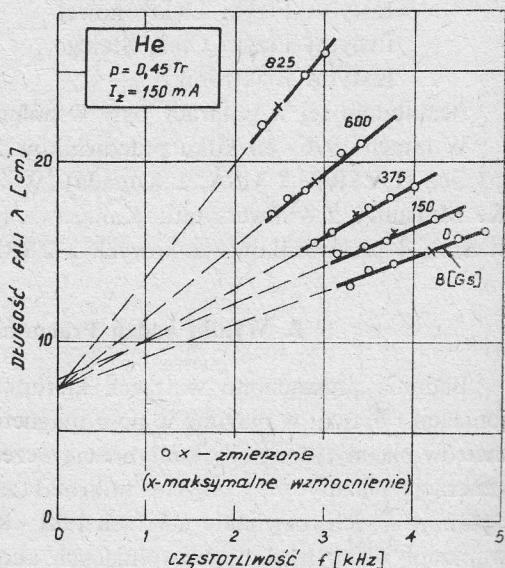
Badania prowadzono w trzech kierunkach, z których dwa pierwsze dotyczące fal jonizacji i dyfuzji w plazmie w polu magnetycznym oraz metod pomiaru lokalnych parametrów plazmy, stanowiły kontynuację wcześniejszych prac. Natomiast badania procesów generacji plazmy przy użyciu mikrofal zapoczątkowano w okresie sprawozdawczym i planuje się ich rozwijanie w latach 1981 - 85 z ukierunkowaniem na badanie wyładowań w przepływającym gazie wywołujących akcję laserową.

Badania procesów falowych w plazmie obejmowały ustalenie wpływu pola magnetycznego na fale jonizacji w wyładowaniu jarzeniowym. Prowadzono w tym zakresie przede wszystkim intensywne badania eksperymentalne [2.1, 2.2, 2.3]. Prace wykonywano częściowo we współpracy z Uniwersytetem Karola w Pradze i Instytutem Fizyki ČSAV w Pradze. Opracowano teorię fal jonizacji w plazmie w polu magnetycznym [2.2, 2.4]. Rozwijając istniejące teorie — hydrodynamiczną i kinetyczną — dotyczące przypadku izotropowej plazmy, dokonano uogólnienia na przypadek występowania pola magnetycznego. Przeprowadzono eksperymentalną weryfikację wyników tych teorii z pozytywnym wynikiem. Na rysunku 2.1 przedstawiono porównanie mierzonych i obliczonych zmian względnych wartości częstotliwości f/f_0 i długości λ/λ_0 fal jonizacji w funkcji indukcji pola magnetycznego, a na rysunku 2.2 — ustalone eksperymentalnie krzywe dyspersji fal jonizacji przy różnych wartościach indukcji pola magnetycznego [2.3]. Prowadzono eksperymentalne badania struktury zaburzenia plazmy związanego z istnieniem fali jonizacji [2.4]. Stwierdzono, że przestrzenny rozkład amplitudy składowej zmiennej w czasie zmian koncentracji elektronów jest taki sam jak rozkład średniej czasowej wartości koncentracji. Występuje to zarówno w obszarze klasycznej dyfuzji, jak i w przypadku gdy dyfuzja jest znacznie podwyższona („anomalna”) w wyniku istnienia makroskopowej niestabilności plazmy, a rozkład średniej koncentracji odbiega od klasycznego. Celem pracy było eksperymentalne potwierdzenie dominującej roli dyfuzji w kształtowaniu przebiegu procesów falowych w plazmie.

Przeprowadzono eksperymentalne i teoretyczne badania wzajemnego oddziaływania dwóch typów samowzbudnych fal jonizacji („wolnej” i „szybkiej”) w plazmie wyładowania w polu magnetycznym [2.5]. Celem poznawczym prac było wyjaśnienie mechanizmu nieliniowych zjawisk w ośrodkach dyspersyjnych. Eksperymentalnie stwierdzono [2.1]



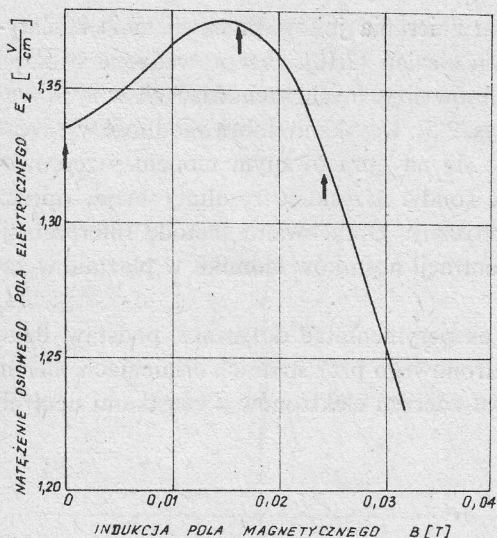
Rys. 2.1. Mierzone i obliczone wartości znormalizowanej częstotliwości f/f_0 i długości fali λ/λ_0 jonizacji w wyładowaniu jarzeniowym w helu, umieszczonym w osiowym polu magnetycznym o indukcji B (p — ciśnienie gazu, I_z — prąd wyładowania, f_0 i λ_0 — częstość i długość fali jonizacji w plazmie bez pola magnetycznego)



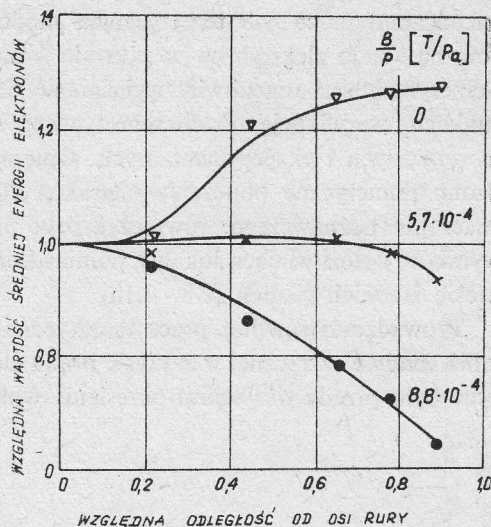
Rys. 2.2. Krzywe dyspersji fal jonizacji, mierzone w warunkach jak na rys. 2.1

występowanie efektu „anomalnej” dyfuzji plazmy wyładowania jarzeniowego w zakresie małych indukcji pola magnetycznego. Efekt ten prowadzi do niemonotonicznych zmian dyfuzji (a więc i natężenia osiowego pola elektrycznego E_z w wyładowaniu — por. rys. 2.3) ze wzrostem indukcji pola magnetycznego. Przeprowadzono cykl eksperymentalnych badań przestrzennych zmian funkcji rozkładu energii elektronów w plazmie (rys. 2.4), uzyskując eksperymentalne potwierdzenie teorii opisującej wpływ pola magnetycznego na przestrzenny rozkład średniej energii elektronów [2.6, 2.7].

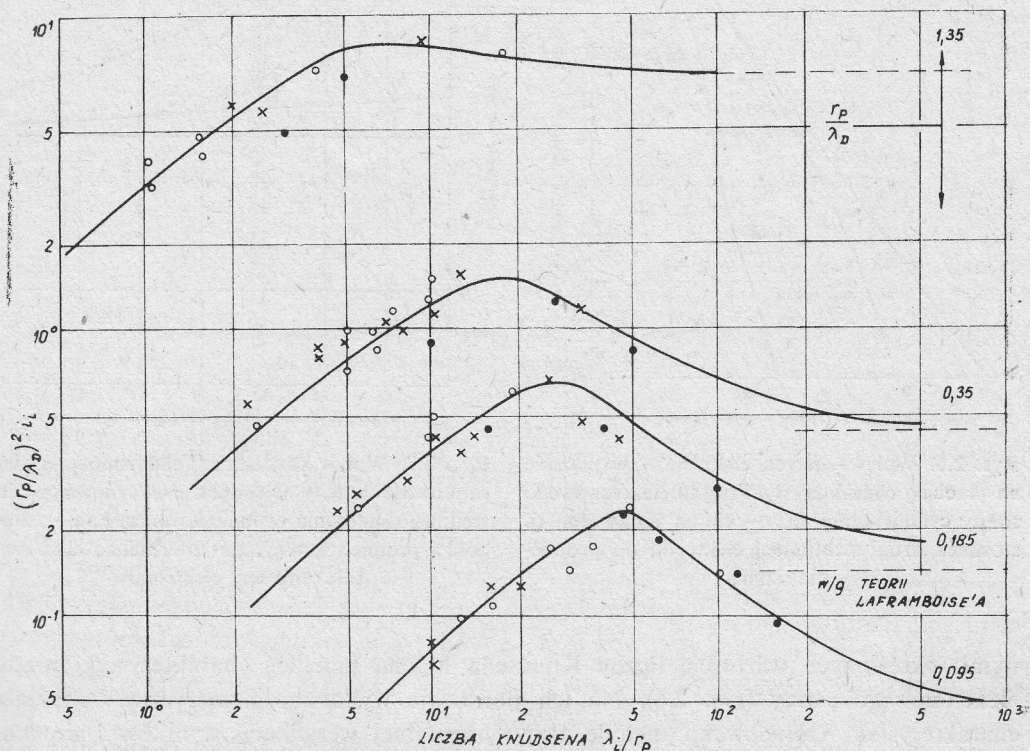
W eksperymentalnych badaniach niestabilności plazmy i procesów falowych w plazmie konieczna jest umiejętność wyznaczania lokalnych i chwilowych parametrów plazmy. Z tego względu w Pracowni Magnetodynamiki Plazmy prowadzi się prace nad rozwojem odpowiednich metod pomiarowych. Dotyczą one przede wszystkim metody sondy elektrycznej oraz metod mikrofalowych z wykorzystaniem anteny liniowej. W okresie 1976 - 80



Rys. 2.3. Natężenie pola elektrycznego w wyładowaniu w neonie. Strzałki odpowiadają kolejnym wartościom indukcji pola magnetycznego z rys. 2.4



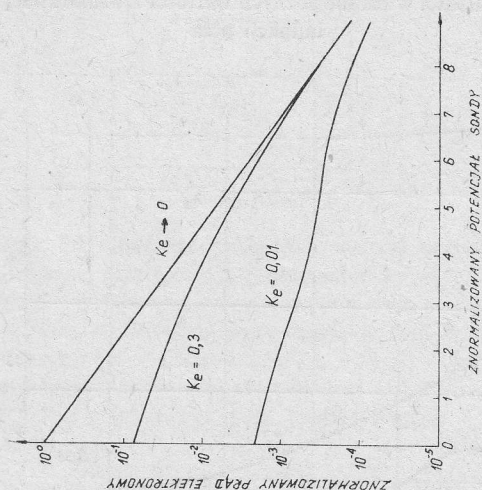
Rys. 2.4. Mierzone radialne rozkłady średniej energii elektronów w wyładowaniu odniesione do wartości w osi dla różnych wartości zredukowanej indukcji pola



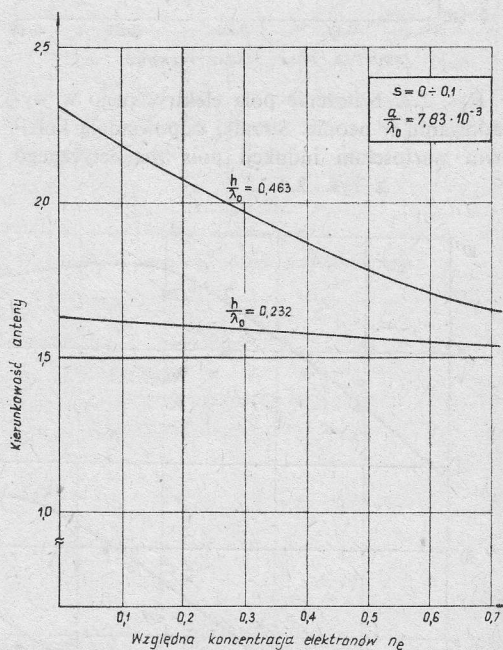
Rys. 2.5. Przewidywane teoretycznie i mierzone zmiany znormalizowanego jonowego prądu sondy w funkcji liczby Knudsen

zakończono prace nad teoretycznym modelem zbierania jonów przez ujemnie spolaryzowaną sondę elektryczną w zakresie średnich ciśnień [2.10]. Przeprowadzone badania eksperymentalne umożliwiły wyjaśnienie procesów fizycznych zachodzących w tych warunkach i weryfikację modelu teoretycznego (rys. 2.5). Uzyskano dobrą zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych. Opierając się na opracowanym modelu przeprowadzono numeryczne obliczenia charakterystyk sondy. Uzyskane rezultaty mają, oprócz znaczenia poznawczego, również aspekt praktyczny. Opracowano metodę interpretacji wyników umożliwiającą lokalny pomiar koncentracji nośników ładunku w plazmie w zakresie średnich ciśnień [2.8 - 2.10]

Prowadzono również prace teoretyczne i eksperymentalne dotyczące podstaw działania sondy elektrycznej w zakresie prądu elektronowego przy średnich ciśnieniach. Celem prac było przede wszystkim określenie wpływu zderzeń elektronów z cząstkami neutral-



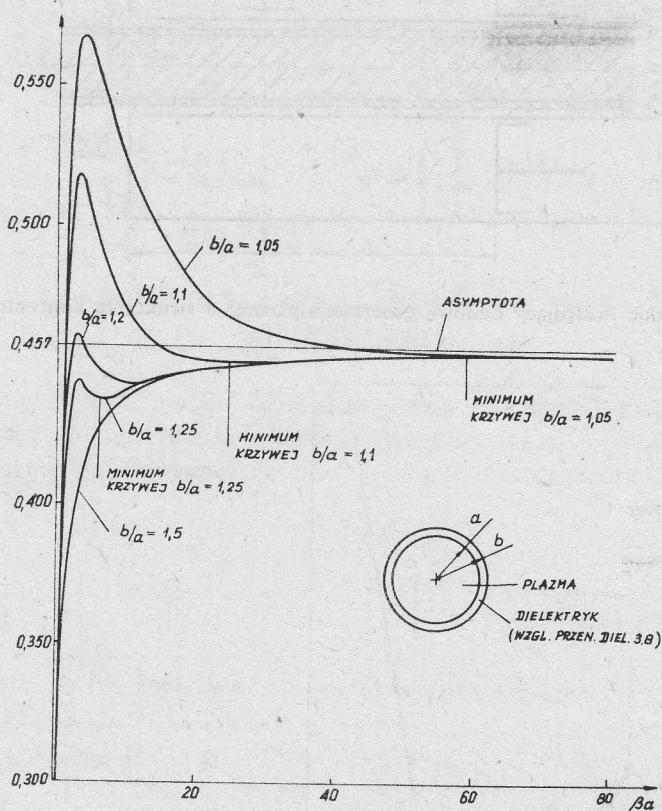
Rys. 2.6. Wpływ zderzeń elektronów w plazmie na przebieg charakterystyki prądu elektronowego sondy cylindrycznej (K_e — liczba Knudsen, tj. stosunek drogi swobodnej elektronu do promienia sondy)



Rys. 2.7. Wpływ koncentracji elektronów na kierunkowość anteny (stosunek maksymalnego do średniego natężenia promieniowania) h , a — długość i promień anteny, s — znormalizowana częstość zderzeń elektronów

nymi, określonych wartością liczby Knudsen K_e , na przebieg charakterystyki prądu elektronowego sondy (rys. 2.6). Na ich podstawie wykonano numeryczne obliczenia charakterystyk. Opracowano metodę eksperymentalnej weryfikacji wyników i uruchomiono odpowiednią aparaturę. Prace eksperymentalne nie zostały jeszcze zakończone [2.11 - 2.13].

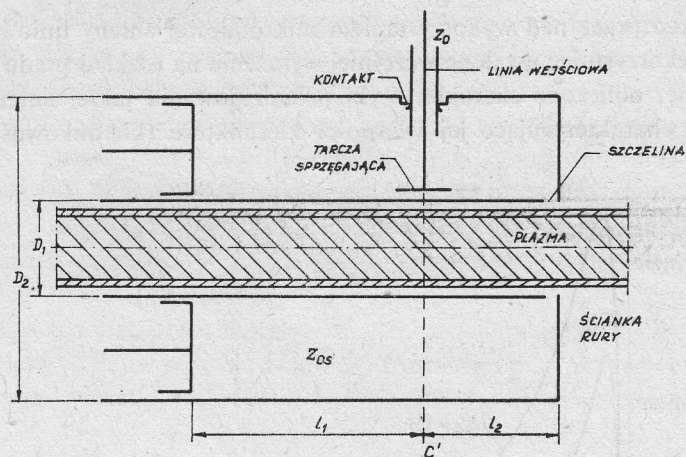
Kontynuowano prace nad wykorzystaniem mikrofalowej anteny liniowej w diagnostyce plazmy. Wykorzystując ustalone wcześniej wyrażenia na rozkład prądu anteny w izotropowej plazmie, obliczono charakterystyki promieniowania takiej anteny oraz parametry liczbowe charakteryzujące jej własności kierunkowe (kierunkowość i szerokość



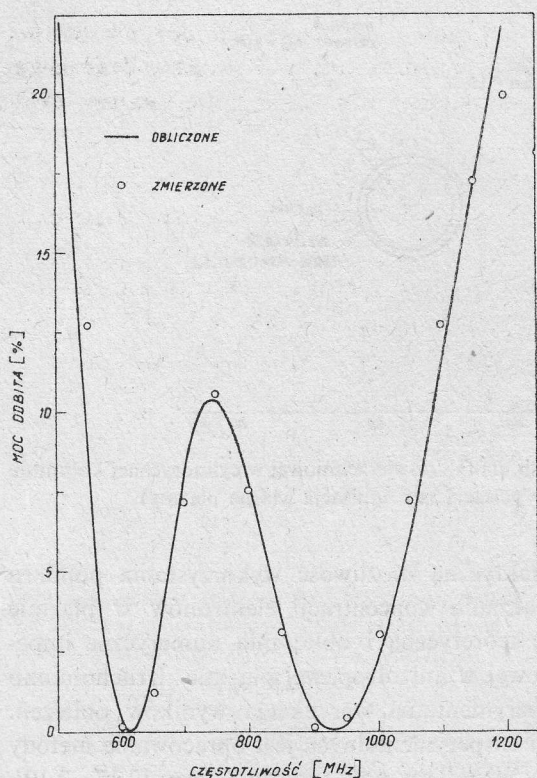
Rys. 2.8. Szczegółowa struktura krzywych dyspersji dla fali powierzchniowej w cylindrycznej kolumnie plazmy (β – liczba falowa, ω , ω_p – pulsacja fali i pulsacja własna plazmy)

wiązki promieniowania). Wskazano na praktyczną możliwość wykorzystania pomiaru własności kierunkowych anteny do wyznaczania koncentracji elektronów w plazmie (rys. 2.7), [2.14 - 2.16]. Wykonano analizę teoretyczną i obliczenia numeryczne impedancji wejściowej liniowej anteny mikrofalowej w anizotropowej plazmie. Uruchomiono układ pomiarowy i prowadzona jest eksperymentalna weryfikacja wyników obliczeń. Celem prowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych jest opracowanie metody pomiaru lokalnej koncentracji elektronów w plazmie w polu magnetycznym [2.17 - 2.19].

Badania procesów generacji plazmy przy użyciu mikrofal podjęto w roku 1976. Mają one charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny i dotyczą podstaw fizycznych oddziaływania pola elektromagnetycznego z plazmą oraz optymalizacji struktur, w których to oddziaływanie zachodzi. Celem poznawczym prac jest wyjaśnienie mechanizmów fizycznych zachodzących w mikrofalowych generatorach plazmy, a celem użytkowym – opty-

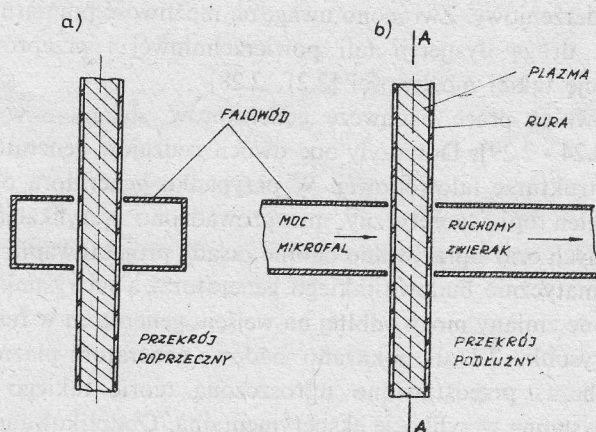


Rys. 2.9. Szkic ilustrujący budowę generatora plazmy o strukturze koncentrycznej



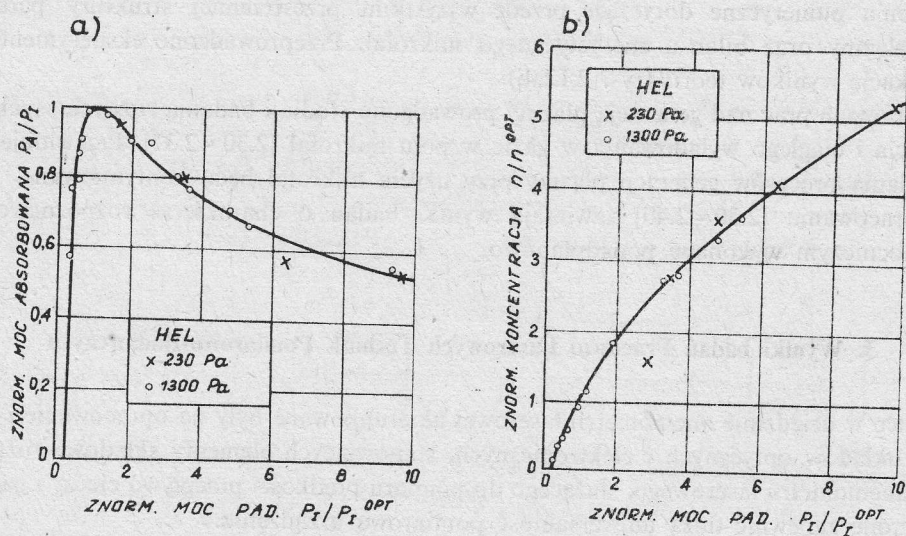
Rys. 2.10. Przebieg zmian mocy mikrofal odbitych na wejściu generatora plazmy w funkcji częstotliwości

malizacja warunków pracy generatorów z punktu widzenia parametrów otrzymywanej plazmy oraz bilansu mocy mikrofal. Prace prowadzone były w ścisłej współpracy z grupami badawczymi Instytutu Fizyki Plazmy ČSAV w Pradze i Uniwersytetu Montrealskiego [2.22 - 2.28, 2.33].



Rys. 2.11. Budowa generatora o strukturze falowodowej

Podjęte zostały badania możliwości wykorzystania propagacji fali powierzchniowej do generacji długich kolumn plazmy o gęstości ponadkrytycznej. Wykonano cykl badań warunków propagacji fali powierzchniowej w kolumnie niskociśnieniowej plazmy. Prze-



Rys. 2.12. Wpływ wartości mocy fali padającej na wartość mocy absorbowanej (a) i koncentracji elektronów (b) w wyładowaniu wewnątrz falowodu; linia ciągła oznacza wyniki teoretyczne

prowadzono studia teoretyczne i wykonano obliczenia numeryczne krzywych dyspersji dla takich warunków [2.20, 2.21]. Ustalono szczegółową strukturę tych krzywych. Przykład pokazany jest na rysunku 2.8. Wykazano eksperymentalnie, że tłumienie fali powierzchni-

wej ma charakter zderzeniowy. Zwrócono uwagę na możliwość pomiaru koncentracji elektronów w plazmie drogą dyspersji fali powierzchniowej i przeprowadzono eksperymentalną weryfikację takiej możliwości [2.21, 2.28].

Prowadzono również prace badawcze generatorów plazmy z wykorzystaniem fali powierzchniowej [2.24 - 2.29]. Dotyczyły one dwóch rodzajów generatorów: o strukturze współosiowej i o strukturze falowodowej. W przypadku generatora o strukturze współosiowej podano pełen opis teoretyczny, przeprowadzono weryfikację eksperymentalną wyników teoretycznych oraz opracowano ogólne zasady projektowania [2.26]. Na rysunku 2.9 pokazano schematycznie budowę takiego generatora, a na rysunku 2.10 porównano obliczone i zmierzone zmiany mocy odbitej na wejściu generatora w funkcji częstotliwości pracy. Z kolei na rysunku 2.11ab pokazano budowę generatora plazmy o strukturze falowodowej. Dotychczas przedstawiono uproszczoną teorię takiego generatora [2.28] i przeprowadzono wstępną weryfikację eksperymentalną. Opublikowano syntetyczny przegląd dotyczący nowej klasy mikrofalowych źródeł plazmy, pracujących z wykorzystaniem fali powierzchniowej [2.27]. Prowadzono również studia teoretyczne i eksperymentalne mikrofalowych generatorów plazmy o zlokalizowanym obszarze oddziaływania pola mikrofal z gazem roboczym pod obniżonym ciśnieniem [2.28 - 2.32]. Badania dotyczyły generacji plazmy wewnątrz falowodu. Szczególną uwagę poświęcono możliwości wytwarzania plazmy o koncentracji ponadkrytycznej. Wykazano, że układ pobudzania mikrofalami złożony ze standardowych elementów falowodowych i prosty w obsłudze, może zapewnić efektywny transfer mocy mikrofal do plazmy. Przeprowadzono analizę teoretyczną i obliczenia numeryczne dotyczące przede wszystkim przestrzennej struktury parametrów plazmy oraz bilansu energetycznego mikrofal. Przeprowadzono eksperymentalną weryfikację wyników teorii (rys. 2.12ab).

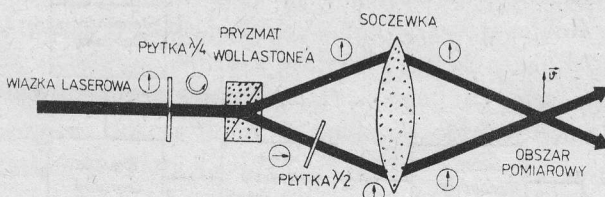
W ramach prac nad generacją plazmy prowadzono studia i badania różnych aspektów przebiegu i ciągłego wyładowania w gazie w polu mikrofal [2.30 - 2.37]. Przewiduje się, że badania procesów generacji plazmy przy użyciu mikrofal będą kontynuowane.

Opracowania [2.30 - 2.40] zawierają wyniki badań o charakterze rozpoznawczym i pomocniczym wykonane ponadplanowo.

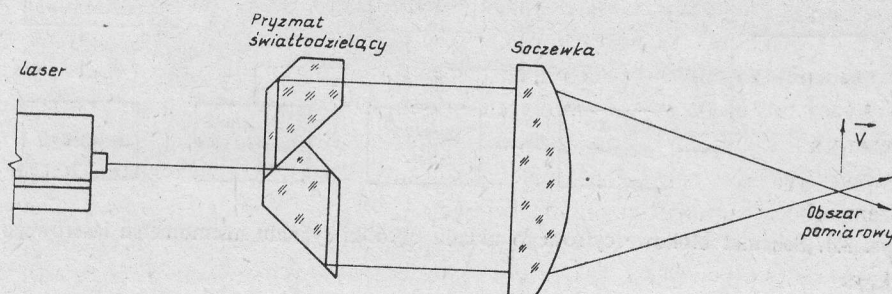
3. Wyniki badań Pracowni Laserowych Technik Pomiarowo-Badawczych

Prace w dziedzinie anemometrii laserowej ukierunkowane były na opracowanie i zbadanie układów optycznych i elektronicznych, stanowiących elementy składowe różnicowego anemometru laserowego, służącego do pomiaru prędkości przepływu cieczy i gazów. Miały one zapewnić dużą uniwersalność pomiarową urządzenia.

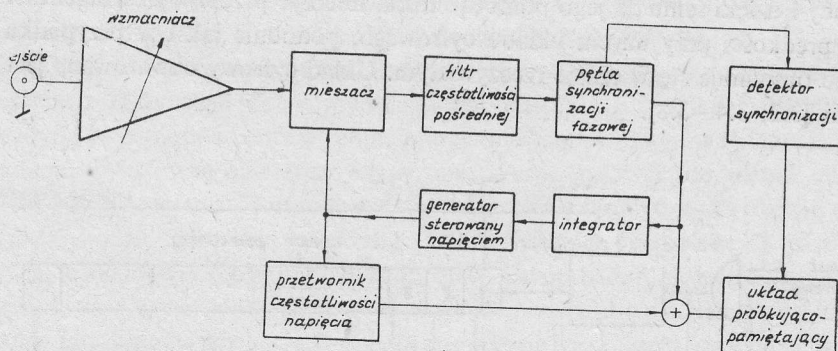
Zaprojektowano, wykonano i sprawdzono doświadczalnie pracę dwóch układów optycznych, formujących tzw. obszar pomiarowy i określających przestrzenną zdolność rozdzielczą anemometru. Pierwszy układ oparty jest na właściwościach pryzmatu Wollstone'a (rys. 3.1), natomiast dla drugiego układu zaprojektowano i wykonano specjalny pryzmat światłodzielną (rys. 3.2). Oba układy optyczne zapewniają możliwość dokonywania pomiaru prędkości przepływu z dużą przestrzenną zdolnością rozdzielczą i w szerokim zakresie zmian położenia obszaru pomiarowego [3.1, 3.2].



Rys. 3.1. Schemat układu optyki wejściowej różnicowego anemometru laserowego z pryzmatem Wollastone'a



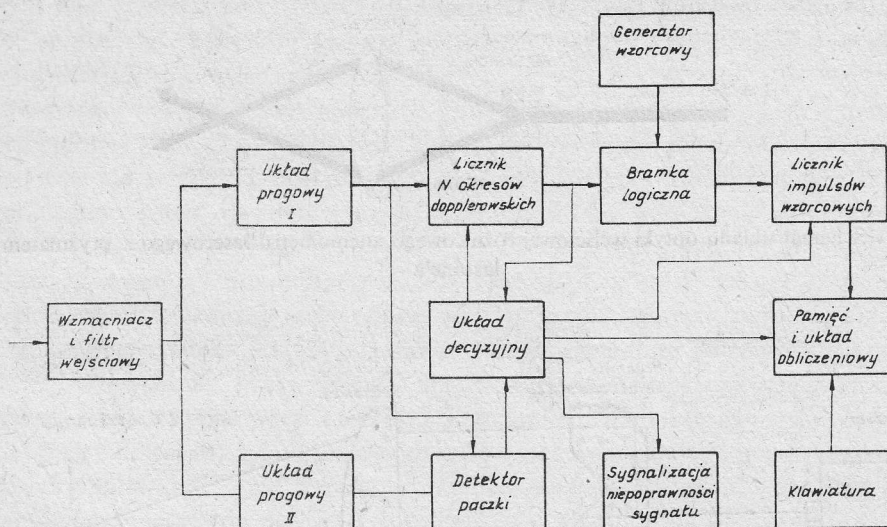
Rys. 3.2. Schemat układu optyki wejściowej różnicowego anemometru laserowego z pryzmatem światłodzielnicy



Rys. 3.3. Schemat blokowy elektronicznego układu śledzącego do obróbki sygnału anemometru laserowego

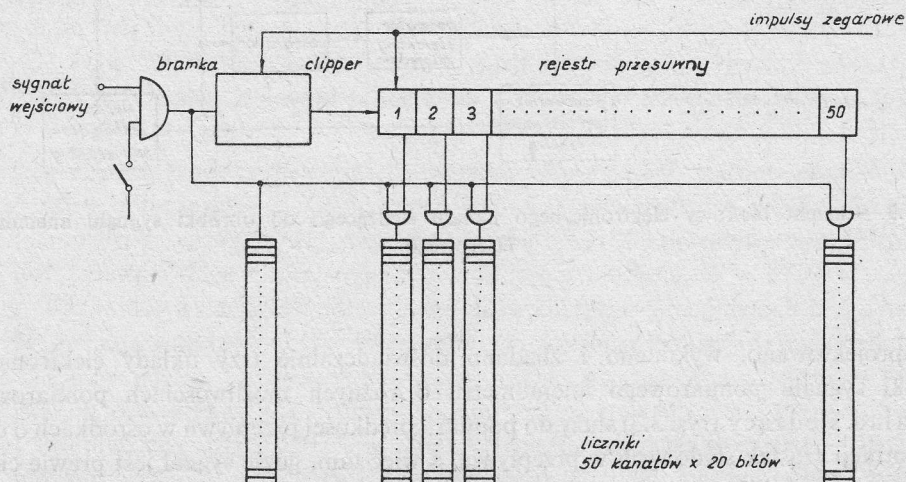
Zaprojektowano, wykonano i zbadano doświadczalnie trzy układy elektronicznej obróbki sygnału pomiarowego anemometru o różnych możliwościach pomiarowych.

Układ śledzący (rys. 3.3) służy do pomiaru prędkości przepływu w ośrodkach o dużej koncentracji cząstek śladowych w przepływie, a więc tam, gdzie sygnał jest prawie ciągły. Wyniki pomiaru dokonywanego przez układ śledzący otrzymuje się w postaci analogowej w czasie rzeczywistym [3.3].



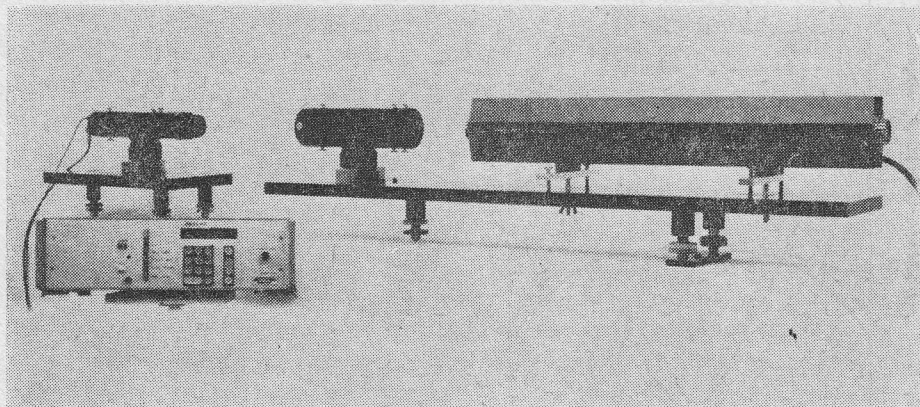
Rys. 3.4. Schemat blokowy cyfrowego układu obróbki sygnału anemometru laserowego

Układ cyfrowy (rys. 3.4) szczególnie nadaje się do pomiaru prędkości przepływu ośrodka o małej koncentracji cząstek śladowych, powodującej, że sygnał pomiarowy ma charakter dyskretny. Opracowany układ cyfrowy charakteryzuje się dużą dynamiką zakresu pracy i dzięki temu za jego pomocą można mierzyć przepływy turbulentne. Wyniki pomiaru prędkości przy użyciu układu cyfrowego, podobnie jak i w przypadku układu śledzącego otrzymuje się w czasie rzeczywistym. Układ cyfrowy obwarowany jest dwoma patentami [3.2, 3.4 - 3.8].



Rys. 3.5. Schemat blokowy korelatora cyfrowego do obróbki sygnału anemometru laserowego

Korelator fotonowy (rys. 3.5) służy do pomiarów prędkości przepływów w często spotykanych praktycznie sytuacjach, kiedy świetlny sygnał pomiarowy jest słaby. Typowym przykładem takiej sytuacji są pomiary przepływu gazów o naturalnym zanieczyszczeniu pyłem. Pewną niedogodnością opracowanego korelatora, którą należy jeszcze wyeliminować jest konieczność dokonywania po pomiarze obróbki danych, celem otrzymania ostatecznych wyników pomiaru [3.9].



Rys. 3.6. Widok ogólny różnicowego anemometru laserowego z cyfrowym układem obróbki sygnału

Działanie wykonanego modelu anemometru laserowego przedstawionego na rysunku 3.6 zostało praktycznie sprawdzone z pozytywnym wynikiem w czasie badań przepływów cieczy w kanale kawitacyjnym Zakładu Pędników Okrętowych IMP PAN i w kanale hydraulicznym Zakładu Hydrauliki Wód Śródlądowych IBW PAN.

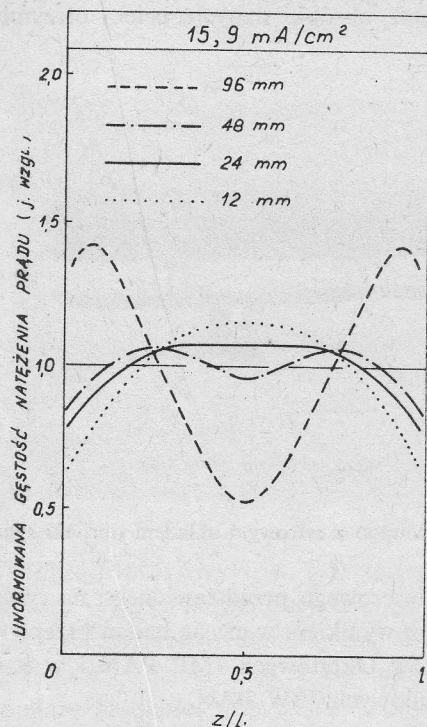
Prace badawcze w dziedzinie anemometrii laserowej wykonywano częściowo w ramach współpracy z Instytutem Telekomunikacji Politechniki Gdańskiej, Polskimi Zakładami Optycznymi w Warszawie oraz w ramach fundacji Japan Society for Promotion of Science.

Badania wyładowań elektrycznych w mieszaninie gazów i par metali miały na celu zbadanie możliwości zastosowania wyładowania elektrycznego w katodzie wnękowej do generacji promieniowania laserowego w mieszaninach helu i innych gazów z parami metali, a w szczególności w parach kadmu. W czasie badań okazało się, że należy rozróżnić dwie zasadnicze geometrie katody wnękowej i dwa przypisane im typy wyładowania, a mianowicie katody wnękowe o podłużnej i poprzecznej geometrii wyładowania, przy czym wyładowanie poprzeczne może być nisko- i wysokonapięciowe.

Okazało się później, że efektywność wzbudzenia odpowiednich linii laserowych określona jest przez rodzaj wyładowania elektrycznego, uzależnionego od geometrii katody. Dlatego najważniejszym zadaniem wymagającym rozwiązania było wybranie odpowiedniej geometrii katody wnękowej i przebadanie własności zachodzącego w niej wyładowania elektrycznego.

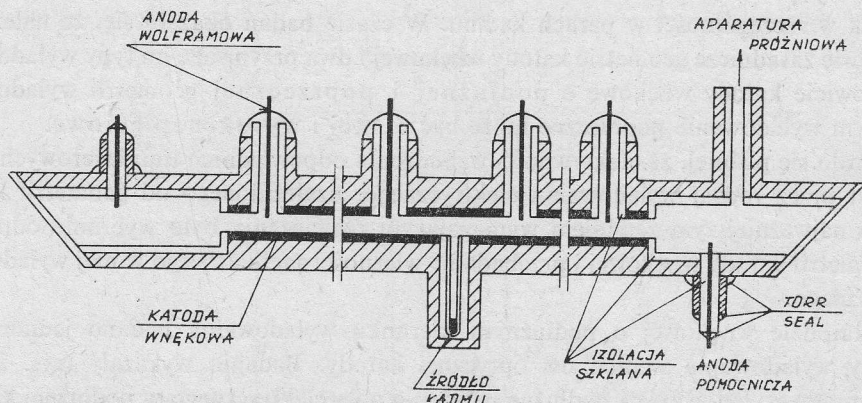
W katodzie wnękowej o podłużnym kierunku wyładowania badano jednorodność kolumny wyładowania wzdłuż osi optycznej katody. Badania wykazały (rys. 3.7), że gęstość prądu wyładowania i podłużne natężenie pola elektrycznego w podłużnej katodzie wnękowej nie są jednorodne wzdłuż osi katody bez względu na jej długość i warunki wy-

ładowania. Otrzymane wyniki pozwalają zaprojektować i dobierać do celów laserowych podłużne katody wnekowe o znanym osiowym rozkładzie gęstości prądu katodowego i natężeniu pola [3.10].

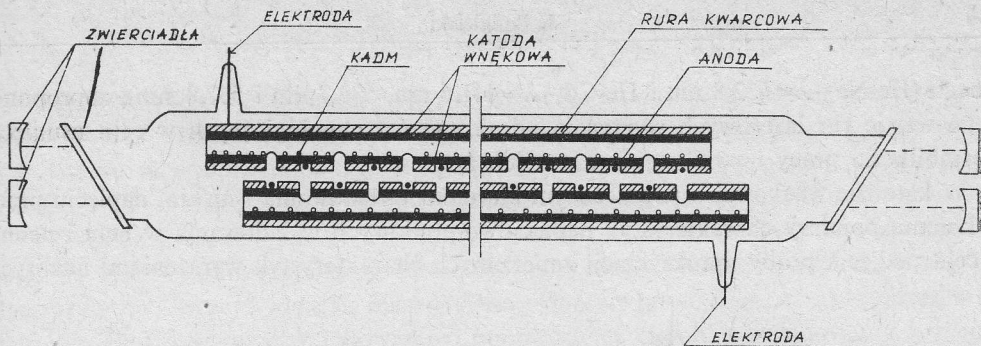


Rys. 3.7. Unormowany rozkład gęstości natężenia prądu wzdłuż katody wnekowej o różnych długościach

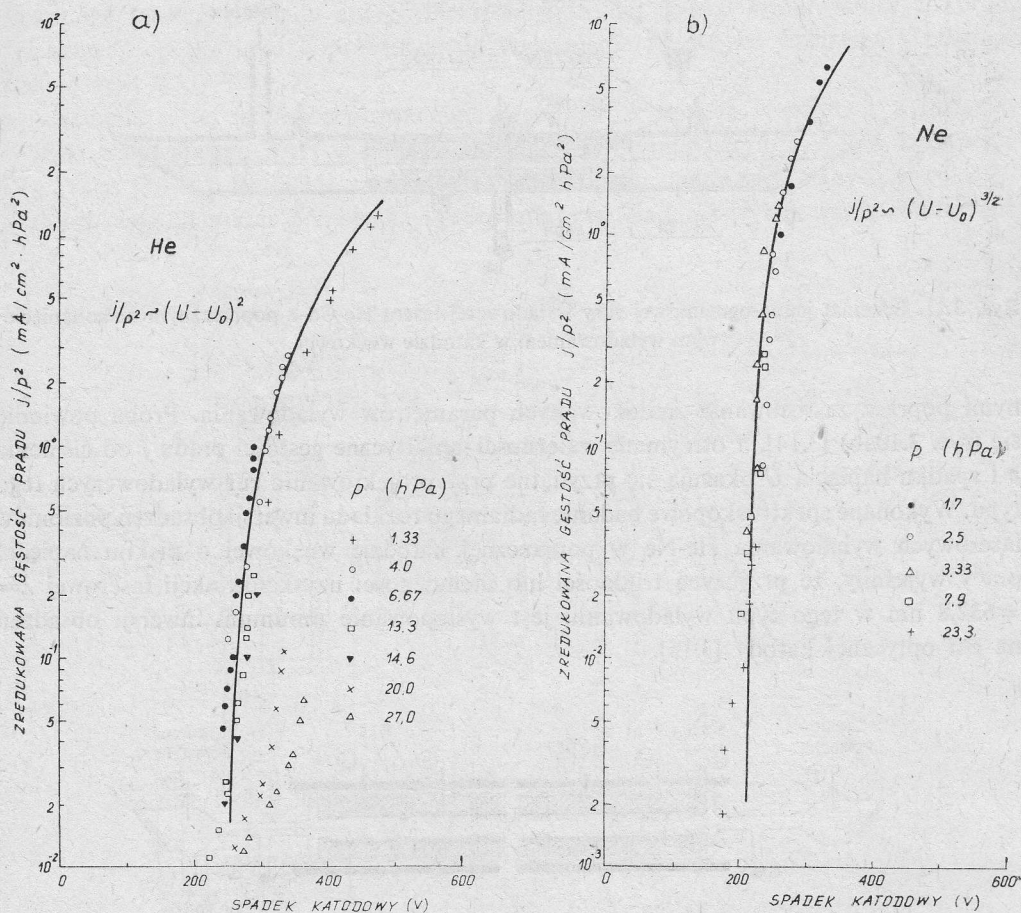
Na podstawie tych badań opracowano, wykonano i przebadano dwie wersje laserowej rury wyladowczej z podłużną katodą wnekową (rys. 3.8 i 3.9) [3.10 - 3.12]. Okazało się jednak, że pomimo pozytywnie zakończonych prób uzyskania akcji laserowej w miesza-



Rys. 3.8. Schemat rury wyladowczej lasera He-Cd o podłużnym kierunku wyladowania



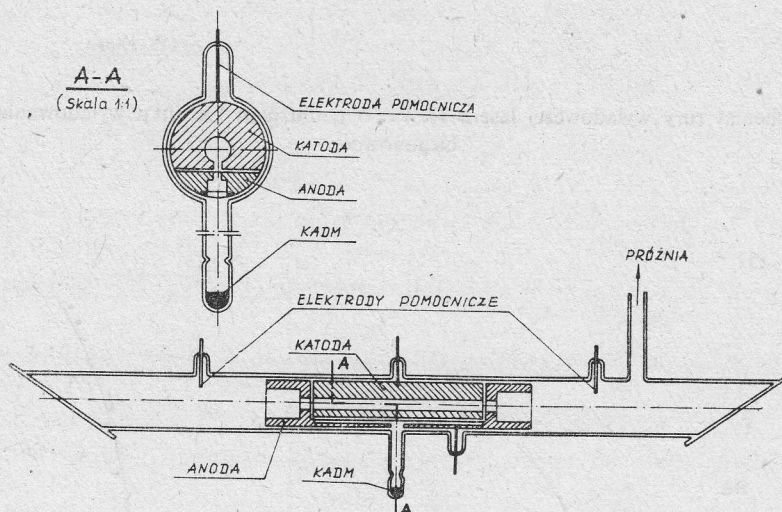
Rys. 3.9. Schemat rury wyladowczej lasera He-Cd, o podłużnym kierunku wyladowania i zmiennej biegunowości



Rys. 3.10. Wyniki pomiarów zredukowanej gęstości prądu j/p^2 w zależności od napięcia pracy U dla różnych wartości ciśnienia w wyladowaniu poprzecznym w katodzie wnekowej; a) dla helu, b) dla neonu. Krzywe ciągłe opisane są wyrażeniami empirycznymi

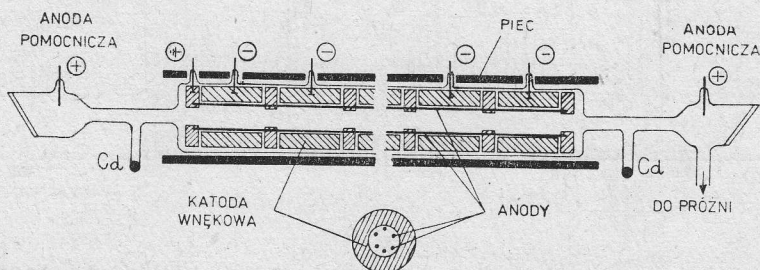
ninach (He-Ne – $\lambda = 632,8$ nm i He-Cd – $\lambda = 441,6$ nm, 533,7 nm i 537,8 nm), zaproponowane wersje rur laserowych wymagają udoskonaleń technologicznych w celu usunięcia niestabilności pracy i zwiększenia czasu ich życia.

W katodzie wnekowej o poprzecznym kierunku wyładowania i niskim napięciu pracy wykonano pomiary charakterystyk napięciowo-prądowych wyładowania w helu i neonie w celu podjęcia próby aproksymacji zmierzonych charakterystyk wyrażeniami analitycz-



Rys. 3.11. Schemat jednosegmentowej rury wyładowczej lasera He-Cd z poprzecznym niskonapięciowym wyładowaniem w katodzie wnekowej

nymi poprzez zastosowanie zredukowanych parametrów wyładowania. Próba powiodła się (rys. 3.10ab) [3.14], a otrzymane zależności analityczne gęstości prądu j od ciśnienia p i spadku napięcia U okazują się przydatne przy projektowaniu rur wyładowczych tego typu. Wykonane spektroskopowe badanie radialnego rozkładu inwersji obsadzeń poziomów laserowych wyładowania He-Ne w poprzecznej katodzie wnekowej o niskim napięciu pracy wyjaśniły, że przyczyną trudności lub niemożności uzyskania akcji laserowej $\lambda = 632,8$ nm w tego typu wyładowaniu jest występowanie minimum inwersji obsadzeń na osi optycznej katody [3.15].



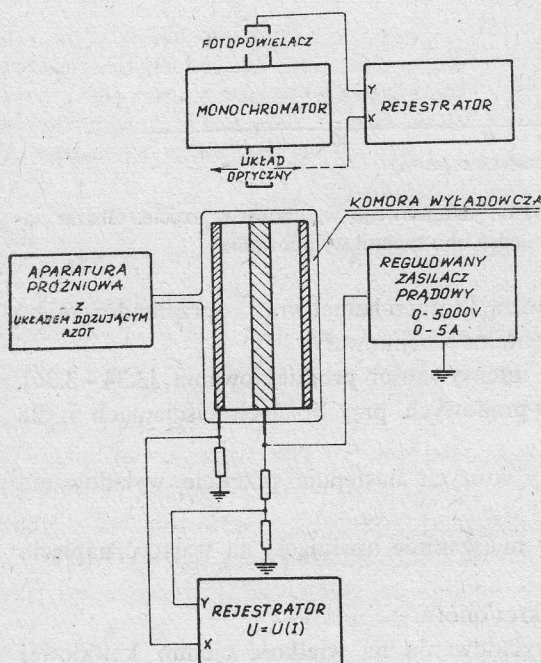
Rys. 3.12. Schemat wielosegmentowej rury wyładowczej lasera He-Cd z poprzecznym wysokonapięciowym wyładowaniem w katodzie wnekowej

Zaprojektowano i wykonano dwie rury laserowe z poprzeczną katodą wnąkową o niskim i wysokim napięciu pracy oraz o różnych sposobach wprowadzania i utrzymywania par kadmu w wyładowaniu (rys. 3.11, 3.12). Charakterystyki generacji akcji laserowej $\lambda = 533,7$ i $\lambda = 537,8$ nm Cd^+ w obu typach rur wyładowczych przedstawiono w [3.16 - 3.18]. Okazało się, że w rurze wyładowczej o wyższym napięciu pracy uzyskano znacznie większą moc wyjściową generacji laserowej niż w rurze o niższym napięciu pracy i ten typ rury wyładowczej wydaje się mieć większe znaczenie praktyczne. Akcję laserową w mieszaninie He-Cd w rurze wyładowczej o poprzecznym kierunku wyładowania i wysokim napięciu pracy osiągnięto po raz pierwszy w Pracowni.

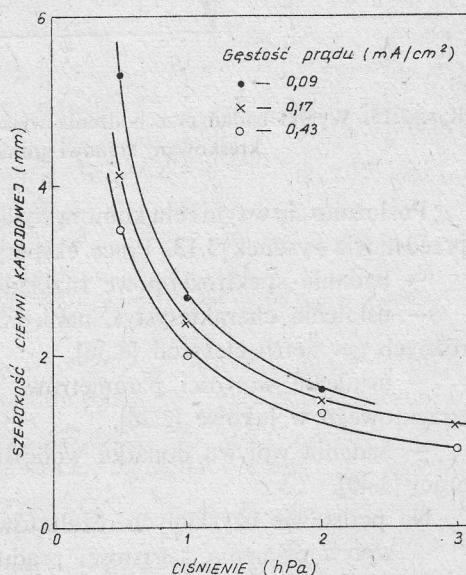
W czasie badań zjawisk zachodzących w wyładowaniu elektrycznym w katodach wnąkowych obu typów (podłużnej i poprzecznej) zauważono, że w obu wyładowaniach istnieją różne efektywności wzbudzenia poziomów laserowych, za co niewątpliwie odpowiedzialna jest funkcja rozkładu energii elektronów. Obecnie trwają intensywne badania eksperymentalne funkcji rozkładu energii elektronów w obu typach wyładowania w katodzie wnąkowej, co powinno doprowadzić do wyjaśnienia różnic we wzbudzeniu poziomów laserowych.

Badania w tej tematyce prowadzono częściowo w ramach współpracy z Instytutem Fizyki Ciała Stałego BAN w Sofii i Centralnego Instytutu Fizyki WAN w Budapeszcie.

Prace [3.14, 3.19 - 3.35] zawierają niektóre wyniki badań wykonanych w roku 1976 lub też mają charakter pomocniczy i rozpoznawczy. Badania wyładowania elektrycznego

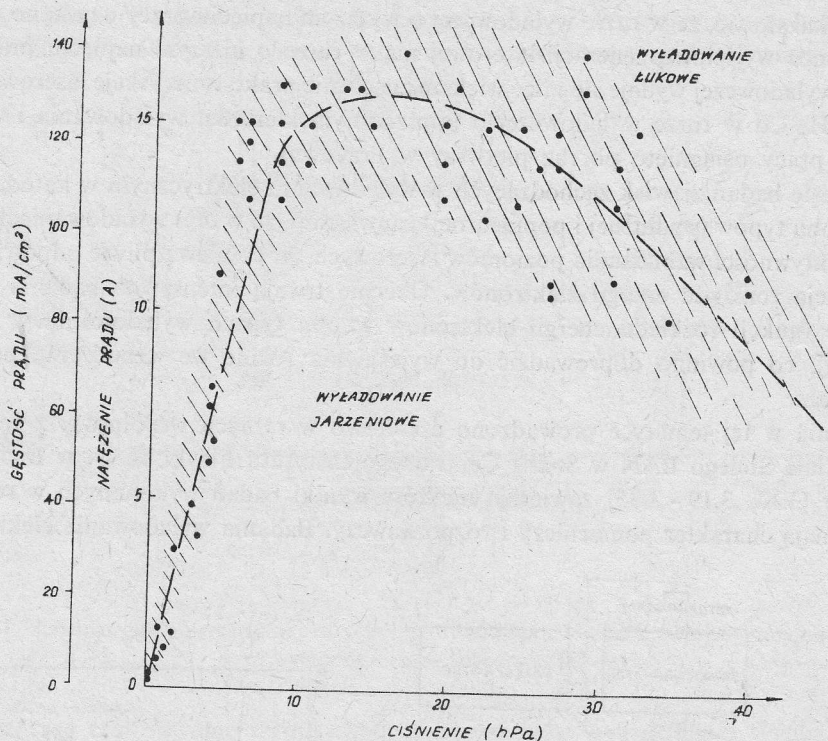


Rys. 3.13. Schemat komory wyładowczej z oprzyrządowaniem do badań spektroskopowych i charakterystyk napięciowo-prądowych wyładowania jarzeniowego w azocie



Rys. 3.14. Zależność szerokości ciemni katodowej od ciśnienia azotu dla różnych gęstości prądu katodowego w wyładowaniu jarzeniowym

w azocie były prowadzone z ukierunkowaniem na proces azotowania jonowego stali i wytwarzanie dyfuzyjnych warstw ochronnych. W związku z tym wykonano badania zjawisk fizycznych zachodzących w obszarze przykatodowym wyładowania.



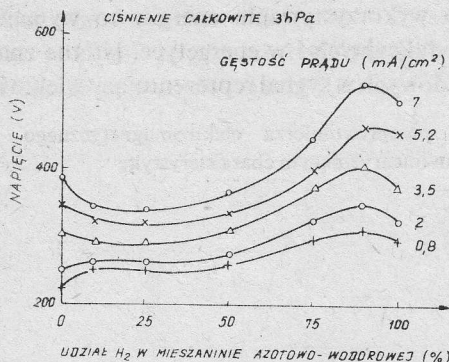
Rys. 3.15. Wyniki badań przechodzenia wyładowania jarzeniowego w łukowe w azocie. Obszar zakreskowany stanowi granicę między obu typami wyładowania

Posłużono się w tym celu komorą wyładowczą, której schemat wraz z oprzyrządowaniem przedstawia rysunek 3.13. Prace eksperymentalne obejmowały:

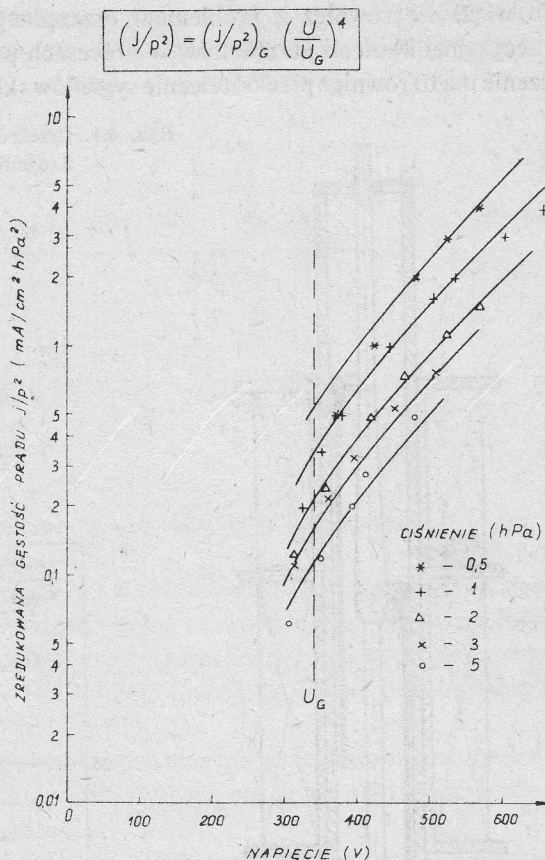
- badania spektroskopowe rozkładów intensywności promieniowania [3.34 - 3.36],
- ustalenie charakterystyk napięciowo-prądowych przy różnych ciśnieniach i dla różnych geometrii elektrod [3.36],
- ustalenie wartości parametrów, przy których następuje przejście wyładowania jarzeniowego w łukowe [3.36],
- badania wpływu dodatku wodoru w mieszaninie azotującej na wartość napięcia pracy [3.40].

Na podstawie uzyskanych rezultatów określono:

- wpływ ciśnienia i gęstości prądu wyładowania na wielkość ciemni katodowej (rys. 3.14) [3.35, 3.36] i minimalną odległość między elektrodami w wyładowaniu,
- zakres parametrów, przy których następuje przejście od wyładowania jarzeniowego do łukowego (rys. 3.15, obszar zakreskowany [3.36]),
- udział wodoru w mieszaninie z azotem, przy którym osiąga się maksymalne na-



Rys. 3.16. Wpływ udziału wodoru w mieszaninie azotującej na wartość napięcia pracy w wyładowaniu jarzeniowym dla różnych gęstości prądu katodowego



Rys. 3.17. Wyniki pomiarów zredukowanej gęstości prądu j/p^2 w zależności od napięcia pracy U dla różnych wartości ciśnienia azotu w wyładowaniu jarzeniowym. Krzywe ciągłe opisane są wyrażeniem empirycznym

pięcie pracy, korzystne przy azotowaniu (udział ten wynosi ok. 80% (rys. 3.16) [3.40]),
— postać równania empirycznego charakterystyki napięciowo-prądowej

$$\frac{j/p^2}{(j/p_0^2)_G} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^b \left(\frac{u}{u_G}\right)^4,$$

gdzie j — gęstość prądu, p — ciśnienie, b — wykładnik zależny od wymiarów komory wyładowczej (rys. 3.17) [3.41].

Dane te mogą być wykorzystane dla ustalenia wytycznych konstrukcyjnych do projektowania komory reaktora stosowanego w azotowaniu jonowym. Prace będą kontynuowane z uwzględnieniem warunków półtechnicznych procesu.

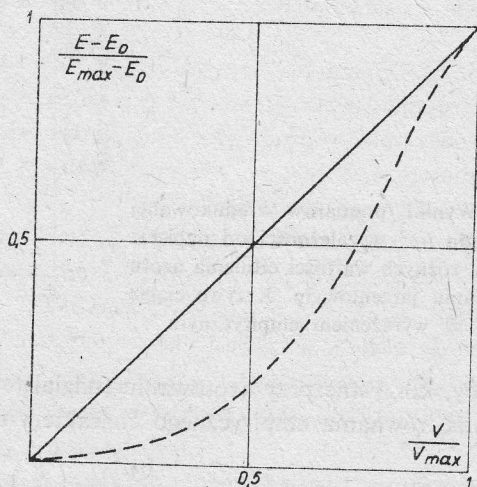
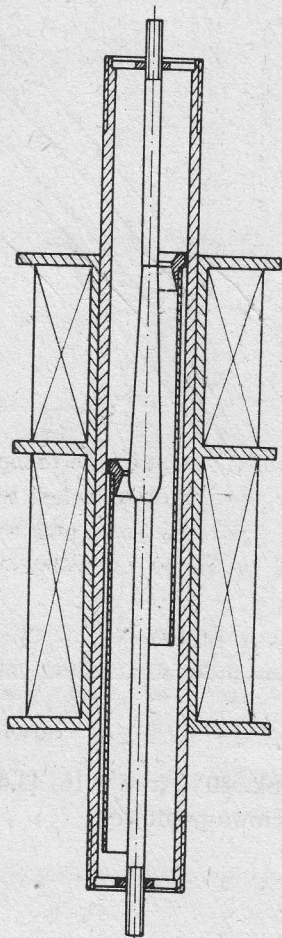
Wyniki innych prac pośrednio związanych z głównymi badaniami planowymi zawierają opracowania [3.37 - 3.39].

4. Wyniki prac zespołu elektrotermomechaniki

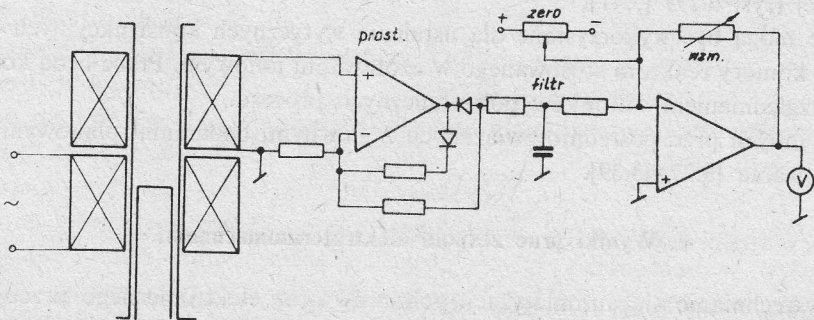
Rozpowszechnianie się automatyzacji pomiarów oraz elektronicznego przetwarzania danych stwarza zapotrzebowanie na odpowiednie przetworniki wielkości termodynamicznych na sygnały elektryczne. Ich dostępność warunkuje rozwój tej techniki. Zagadnienie

to wiąże się również z problemem oszczędnego wykorzystywania energii, co wymaga precyzyjnej kontroli parametrów w procesach produkcyjnych i w energetyce. Istotne znaczenie ma tu również przekształcenie sygnałów składowych w sygnał reprezentujący wielkość

Rys. 4.1. Przekrój przepływomierza elektromagnetycznego z rdzeniem linearyzującym charakterystykę

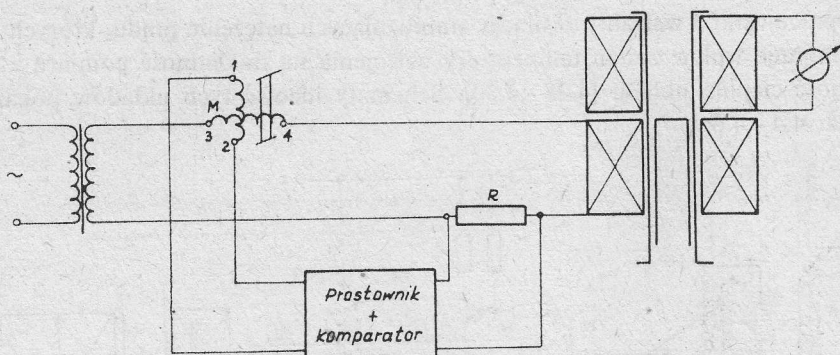


Rys. 4.2. Charakterystyka wyjściowa zwykła i zlinearyzowana elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego



Rys. 4.3. Układ pomiarowy przepływomierza kompensujący fluktuacje napięcia sieci i niezależniający od rezystancji obciążenia

złożoną (np. gęstość gazu zależną od temperatury i ciśnienia albo natężenie przepływu, które jest funkcją różnicy ciśnień i gęstości). W ten sposób można zaoszczędzić wejścia do układów przetwarzających dane.

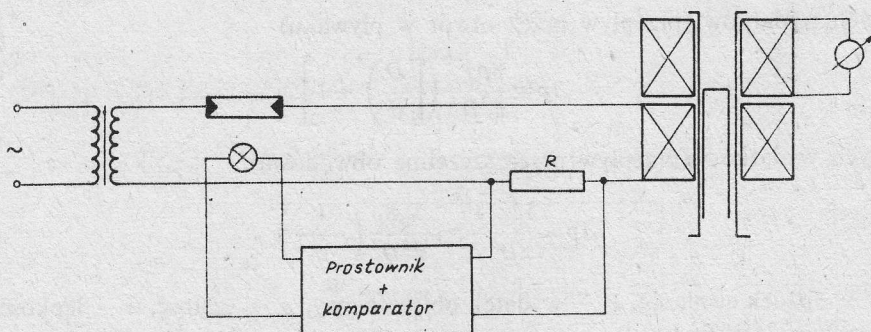


Rys. 4.4. Układ transduktorowy do stabilizacji prądu zasilania przepływomierza

W Zakładzie Dynamiki Plazmy w latach 1976 - 80 opracowano koncepcyjnie różnego rodzaju przetworniki elektryczne oraz prowadzono prace rozwojowe, których celem było udoskonalenie opracowanego wcześniej elektromagnetycznego pływakowego przetwornika natężenia przepływu cieczy i gazów [4.1 - 4.24]. Całość problemu przedstawiono w opracowaniu monograficznym [4.8].

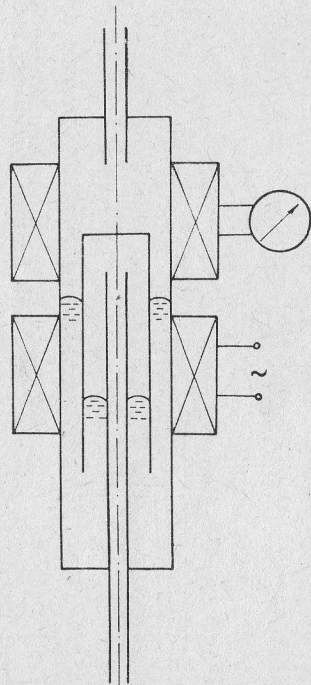
Szczegółowe badania eksploatacyjne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego ujawniły pewne jego niedostatki, które zostały usunięte przez dokonanie modyfikacji i zmian konstrukcyjnych. W szczególności:

- Ustalono zostały optymalne proporcje geometryczne przepływomierza zapewniające maksymalny poziom wyjściowego sygnału elektrycznego [4.5, 4.8, 4.9, 4.14, 4.19, 4.21] oraz maksymalny zakres pomiaru wydatku.

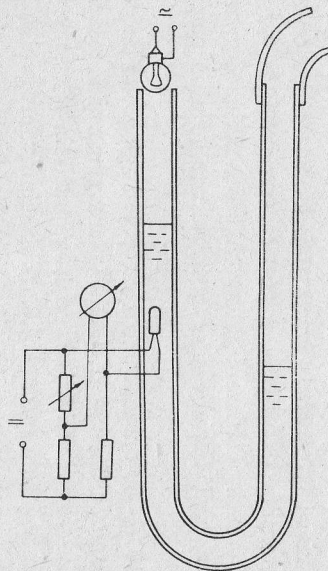


Rys. 4.5. Układ fotorezystorowy do stabilizacji prądu zasilania przepływomierza

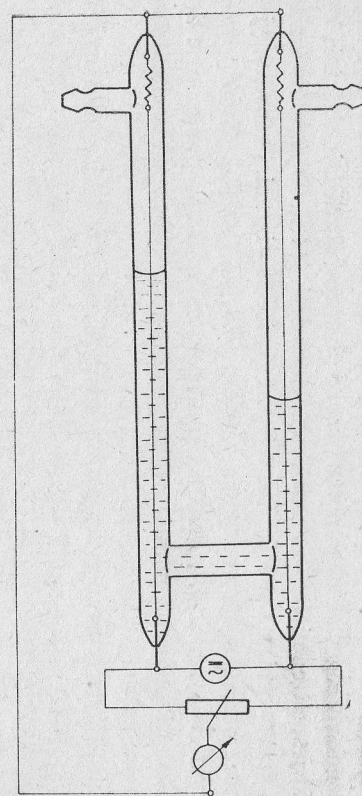
- Zbadano opracowaną wcześniej metodę linearyzacji charakterystyki wyjściowej przepływomierza przez zastosowanie profilowanego rdzenia oraz ustalono metodę wyznaczania kształtu tego rdzenia [4.1, 4.3, 4.8, 4.15]. Przekrój przepływomierza z charaktery-



Rys. 4.7. Schemat wyjaśniający zasadę działania elektromagnetycznego przetwornika ciśnienia



Rys. 4.8. Schemat wyjaśniający działanie fotoelektrycznego przetwornika różnicy ciśnień



Rys. 4.9. Schemat wyjaśniający działanie rezystancyjnego przetwornika różnicy ciśnień

— Przeprowadzono ogólną analizę źródeł błędów wskazań przepływomierzy i możliwości ich zredukowania oraz kompensacji, co stanowi przedmiot będącej na ukończeniu rozprawy doktorskiej [4.4, 4.8, 4.7, 4.13, 4.20, 4.23, 4.38].

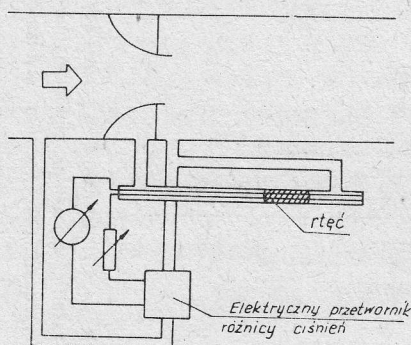
Idea elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego została wykorzystana w opracowaniu elektromagnetycznego pływakowego przetwornika różnicy ciśnień, którego zasada działania jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [4.36]. Wykonano i zbadano prototypy tego przetwornika ustalając na tej podstawie rozwiązania konstrukcyjne eliminujące histerezę wskazań spowodowaną tarciem [4.8, 4.37 - 4.40]. Zasadę działania przetwornika wyjaśnia rysunek 4.7. Przesunięcie pływaka jest proporcjonalne do różnicy ciśnień. Układy zasilające i pomiarowe są podobne jak w przypadku elektromagnetycznego przetwornika natężenia przepływu.

Eliminację histerezy uzyskano przez prowadzenie pływaka w szklanym naczyniu pomiarowym za pomocą kulek stalowych i zastosowanie wólnej od zanieczyszczeń rtęci, spełniającej rolę uszczelnienia.

Przetwornik ten nadaje się do pomiaru różnicy ciśnień w gazach w zakresie $0 \leq \Delta p \leq \leq 400 \text{ mm H}_2\text{O}$, który może być w razie potrzeby podwyższony do $800 \text{ mm H}_2\text{O}$.

Elektromagnetyczny pływakowy przetwornik różnicy ciśnień może być wykorzystany do pomiaru bardzo małych wydatków gazu rzędu $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, jeśli w górnej części pływaka wykonany jest niewielki otwór. Pływak staje się w ten sposób ruchomą kapilarą. Zastosowanie przetwornika dla cieczy napotyka trudności, ze względu na możliwość tworzenia się zamkniętych przestrzeni gazowych, które zakłócałyby wskazania. Z tego względu konieczne byłoby zastosowanie gazu pośredniczącego albo przewidzenie otworów odpowietrzających.

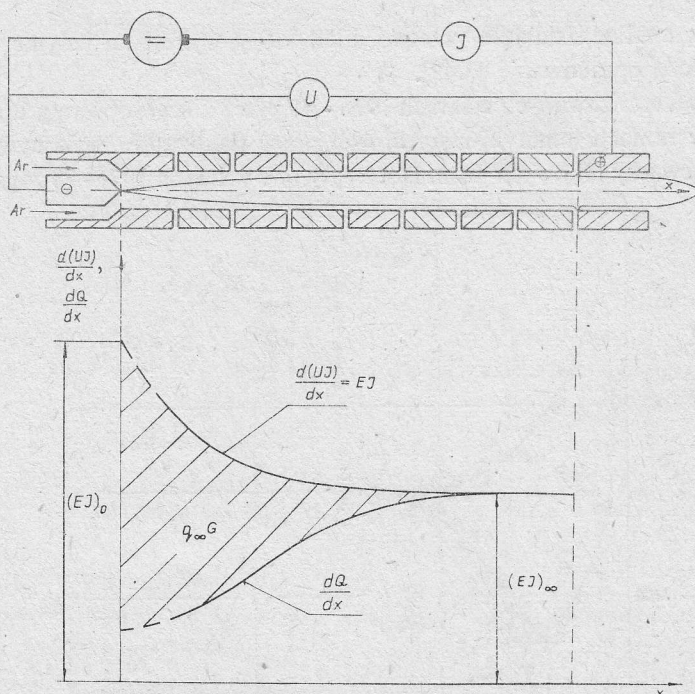
W okresie 1976 - 80 opracowano koncepcje i zgłoszono do opatentowania dwa dalsze przetworniki różnicy ciśnień [4.41, 4.42]. W pierwszym z nich, fotoelektrycznym, wykorzystuje się zależność intensywności światła od drogi przejścia w cieczy wypełniającej rurkę. Jego zasadę działania wyjaśnia rysunek 4.8. W drugim przetworniku [4.43, 4.44] wykorzystuje się różnicę wartości współczynnika przejmowania ciepła w gazie i cieczy. Jego konstrukcję wyjaśnia rysunek 4.9. Drut oporowy rozciągnięty w manometrze U-rurkowym, przez



Rys. 4.10. Schemat wyjaśniający zasadę działania elektrycznego przetwornika gęstości gazu

który przepływa prąd elektryczny osiąga różne temperatury w powietrzu i w cieczy, co wpływa na jego rezystancję. Druty w obu ramionach manometru połączone są w układ mostkowy (rys. 4.9), zrównoważony przy zerowej różnicy ciśnień. Przy zmianach poziomu

cieczy w manometrze na przekątnej mostka pojawia się różnica potencjałów proporcjonalna do różnicy poziomów cieczy, a tym samym do różnicy ciśnień [4.43 - 4.48]. Obydwa przetworniki wymagają udoskonaleń, które można będzie wprowadzić po przeprowadzeniu odpowiednich badań rozwojowych. Do pomiaru chwilowych natężeń przepływu powietrza używane są zwężki (dysze, kryzy). W przypadku gazów wyznaczenie wydatku wymaga znajomości gęstości, którą można wyliczyć przy znanym ciśnieniu i temperaturze. Po-



Rys. 4.11. Podgrzewacz łukowy gazu z dyszą segmentową

ciąga to za sobą konieczność zastosowania trzech czujników, a przy elektronicznym przetwarzaniu danych pomiarowych także zajmuje trzy wejścia. Opracowany został analogowy przetwornik gęstości gazu [4.49], który umożliwia uproszczenie pomiaru. Zasadę działania tego przetwornika, który jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [4.30], przedstawia rysunek 4.10. Składa się on z naczynia zawierającego dowolny gaz, połączonego z rurką kapilarną zamkniętą przesuwną kolumną rtęci. W rurce rozciągnięte są dwa druty oporowe zwierane rtęcią, której położenie zależy od temperatury i ciśnienia gazu w naczyniu. Po zrównaniu ciśnienia i temperatury gazu w naczyniu i przepływającego przez zwężkę, objętość jest odwrotnie proporcjonalna do gęstości

$$V \sim \frac{1}{\rho},$$

przy czym wskaźnikiem zmian objętości jest położenie kolumny rtęci w kapilarze. W układzie przedstawionym na rysunku 4.10 zasilanym ze źródła, którego sygnał napięciowy jest

proporcjonalny do kwadratu masowego natężenia przepływu i odwrotnie proporcjonalny do gęstości

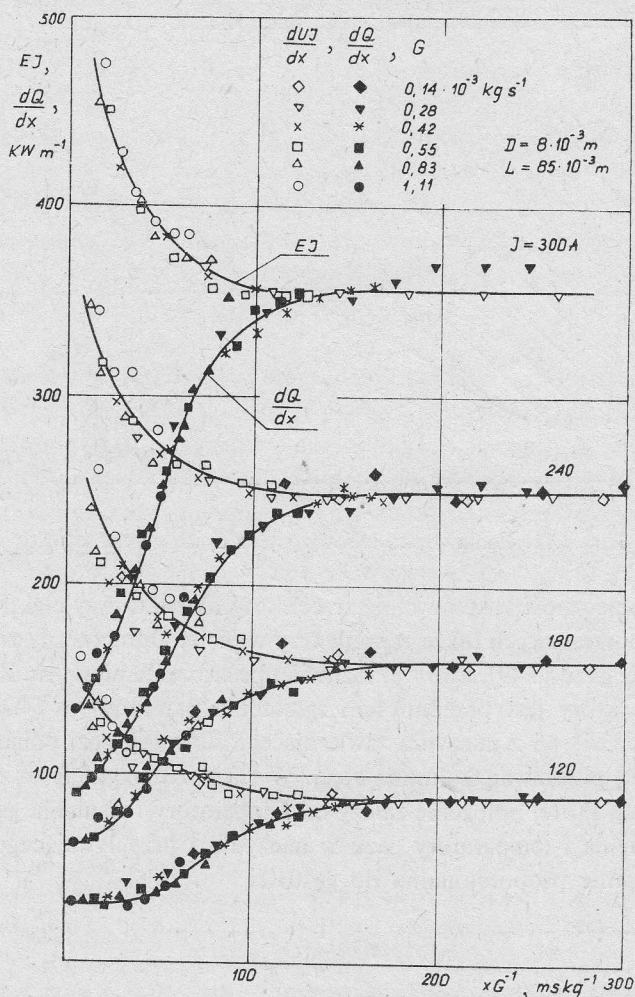
$$\Delta U \sim \frac{G^2}{\rho},$$

ustala się natężenie prądu proporcjonalne do kwadratu masowego natężenia przepływu

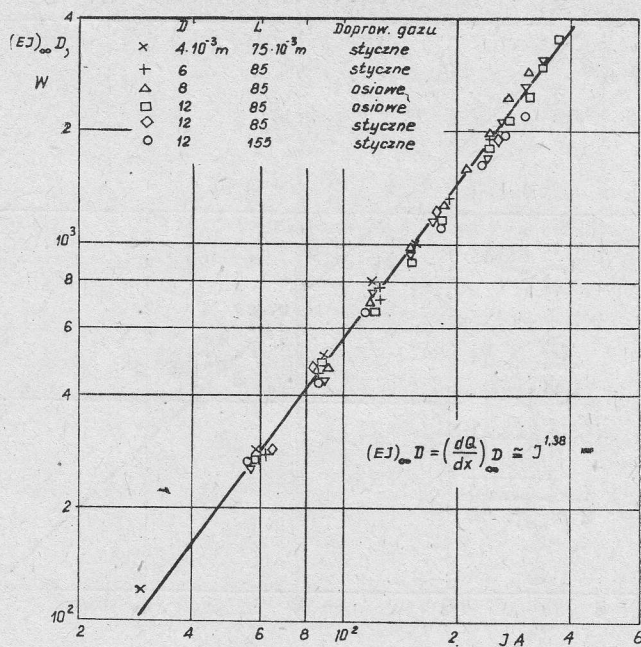
$$I \sim G^2.$$

Szczegółową analizę działania przetwornika, który wykonano jedynie w wersji prototypowej zawiera opracowanie [4.49].

Oprócz badań realizowanych w latach 1976 - 80 przez kilkusobową grupę prowadzone były również w ramach tematyki instytutowej prace finalizujące wykonywane wcześniej badania podgrzewaczy łukowych gazu. Dotyczyły one w latach 1976 - 78 zagadnienia gene-



Rys. 4.12. Ustalane eksperymentalnie rozkłady energii doprowadzanej i odprowadzanej w dyszy o średnicy $D=8$ mm podgrzewacza łukowego zasilanego argonem

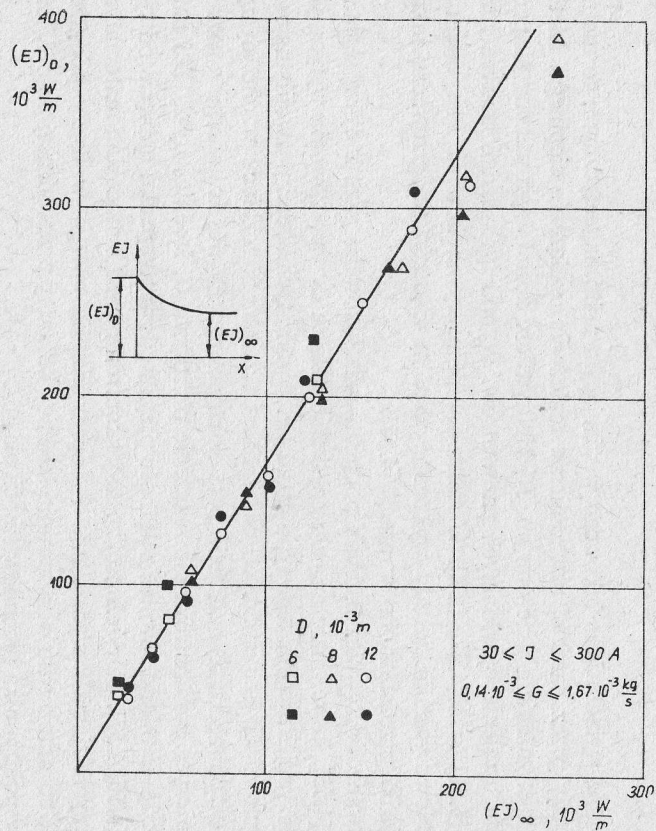


Rys. 4.13. Ustalona eksperymentalnie zależność granicznej wartości natężenia pola elektrycznego od natężenia prądu i średnicy dyszy

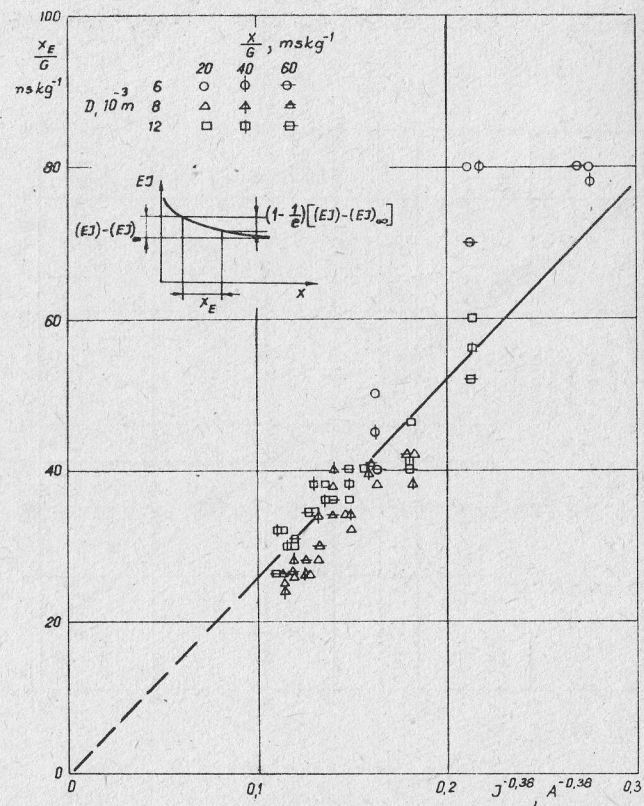
racji wirowania wyladowania łukowego w wirującym polu magnetycznym, co ma na celu ochronę anody przez bardziej równomierne rozłożenie obciążenia cieplnego. Metoda ta jest objęta zastrzeżeniem patentowym. Jej efektywność została sprawdzona eksperymentalnie w celu ustalenia optymalnych parametrów. Wyniki tych badań zawiera rozprawa doktorska [4.51] oraz [4.52, 4.53]. W ramach współpracy naukowej z Instytutem Fizyki Ciepła w Nowosybirsku zostały wykonane wspólne badania podgrzewacza łukowego, których wyniki przedstawiono w pracy [4.54].

Przeprowadzono również badania podgrzewacza łukowego gazu z dyszą segmentową (rys. 4.11) [4.55], które miały na celu uzyskanie danych do opracowania wytycznych dla optymalnego projektowania tego typu urządzeń. Wyniki tych badań pozwoliły na ustalenie uogólnionych relacji empirycznych określających zależność rozkładu wzdłuż dyszy podgrzewacza (współrzędna x) natężenia pola elektrycznego $E = dU/dx$ i energii q gazu od takich zasadniczych parametrów, jak natężenie przepływu G , średnica dyszy D i natężenie prądu I [4.55]. Ustalono również zależność przykatodowego spadku napięcia od tych parametrów [4.56, 4.57]. Te zależności zostały skonfrontowane z modelami matematycznymi rozpatrywanych zjawisk wydzielania i odprowadzania energii w dyszy podgrzewacza [4.58, 4.59], co umożliwiło oszacowanie średnicy kolumny przewodzącej prąd I , temperatury oraz współczynnika przejmowania ciepła.

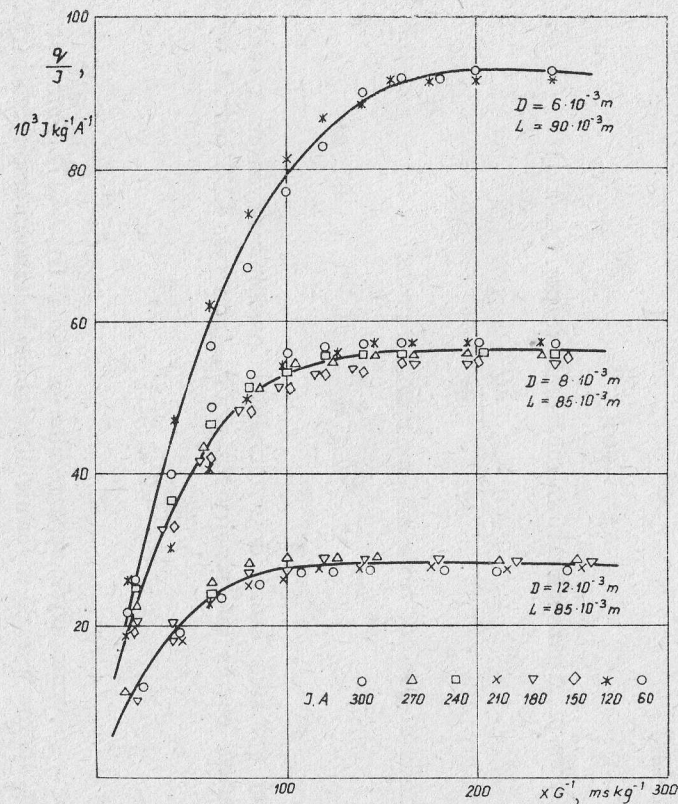
W literaturze, która obejmuje liczne publikacje dotyczące podgrzewaczy łukowych gazu brak jest takich danych, gdyż autorzy ograniczają się do badań strefy, w której wyrównuje



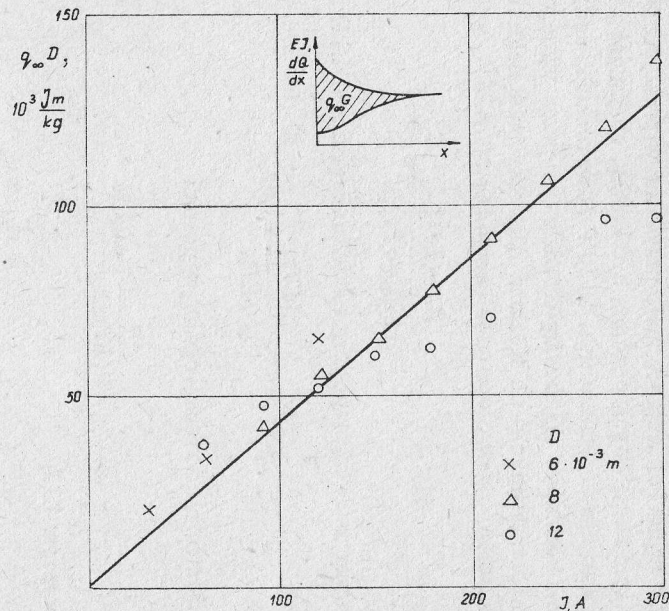
Rys. 4.14. Zależność początkowej wielkości natężenia pola elektrycznego od jego wartości granicznej



Rys. 4.15. Zależność parametru X_E krzywej rozkładu natężenia pola elektrycznego w dyszy podgrzewacza od natężenia prądu i natężenia przepływu gazu



Rys. 4.16. Zależność energii unoszonej przez gaz od współrzędnej wzdłuż dysz podgrzewacza



Rys. 4.17. Zależność granicznej wartości energii gazu od natężenia prądu i średnicy dyszy podgrzewacza

się energia doprowadzana EI i odprowadzana dQ/dx (rys. 4.11). W ten sposób upraszcza się analizę, ale wyniki okazują się mało przydatne w praktyce, gdyż dysza podgrzewacza ze względów sprawnościowych powinna być krótka, obejmując właśnie odcinek, któremu odpowiadają warunki nieustalone (rys. 4.12). Typowe rozkłady natężenia pola elektrycznego E i strumienia cieplnego dQ/dx odprowadzanego przez wodę chłodzącą ścianki dyszy przedstawiono na rysunku 4.12. Rozkład natężenia pola elektrycznego w dyszy można przedstawić w postaci zależności uogólnionej [4.56] (rys. 4.11)

$$\frac{EI - (EI)_{\infty}}{(EI)_0 - (EI)_{\infty}} = e^{-\frac{x}{x_E}}.$$

Uwzględniając ustaloną empirycznie zależność (por. rys. 4.14)

$$\frac{(EI)_0}{(EI)_{\infty}} = 1,62$$

dochodzi się ostatecznie do relacji ogólnej w postaci

$$\frac{EI}{(EI)_{\infty}} - 1 = 0,62e^{-\frac{x}{x_E}},$$

przy czym (por. rys. 4.13)

$$(EI)_{\infty} = \frac{I^{1,38}}{D}$$

oraz (por. rys. 4.15)

$$x_E = 200GI^{-0,38}.$$

Energia q unoszona przez gaz spełnia równanie bilansowe (por. rys. 4.11)

$$G \frac{dq}{dx} = EI - \frac{dQ}{dx}.$$

Energię tę określa uogólnione równanie empiryczne o postaci [4.56]

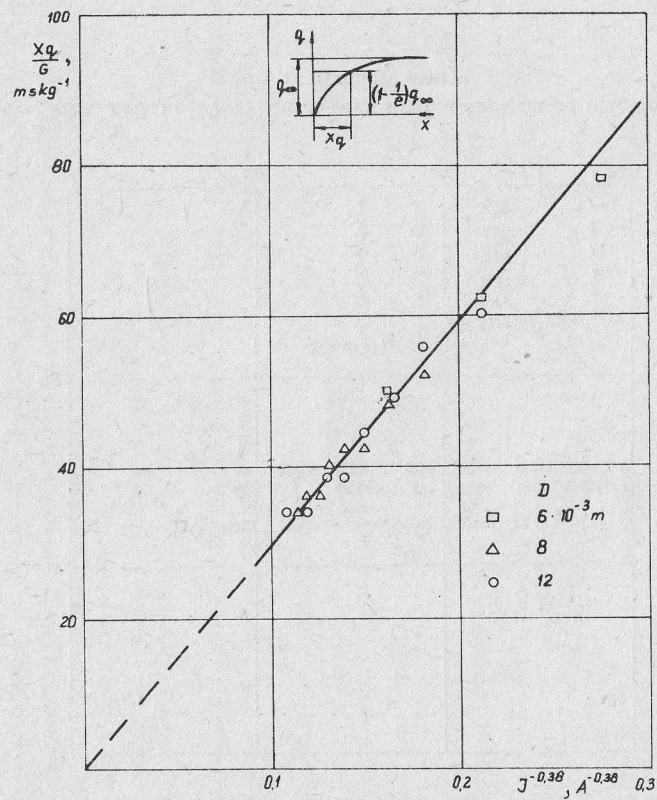
$$\frac{q}{q_{\infty}} = 1 - e^{-\frac{x}{x_q}},$$

odpowiadającej wynikom badań doświadczalnych przedstawionych na rysunku 4.16. Graniczna wartość energii unoszonej przez gaz q_{∞} (por. rys. 4.12) określa wyrażenie:

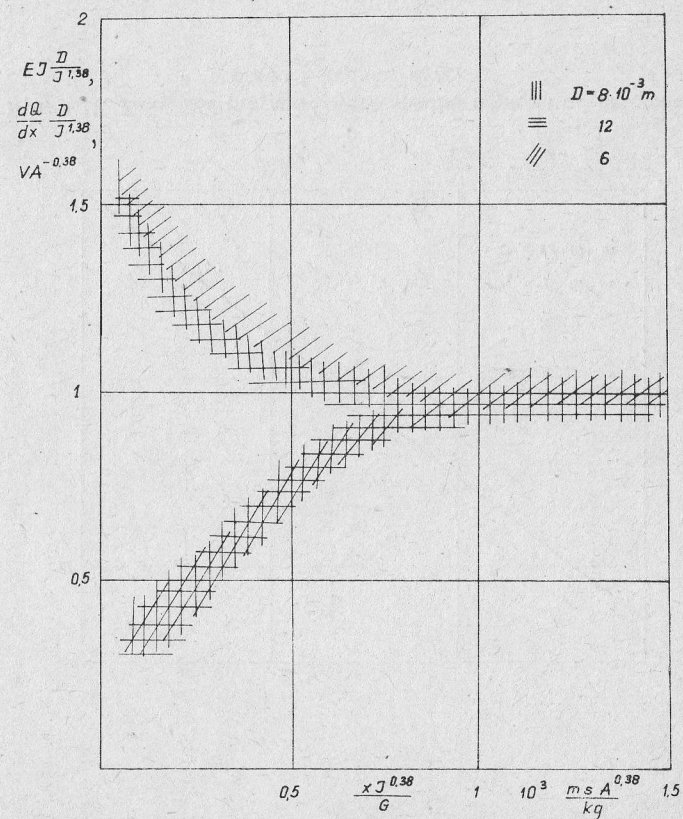
$$q_{\infty} = 0,42 \cdot 10^3 \frac{I}{D},$$

które stanowi uogólnienie uzyskanych rezultatów badań (rys. 4.17). Parametr funkcji wykładniczej x_q można wyrazić w formie uogólnionej zależności empirycznej (rys. 4.18)

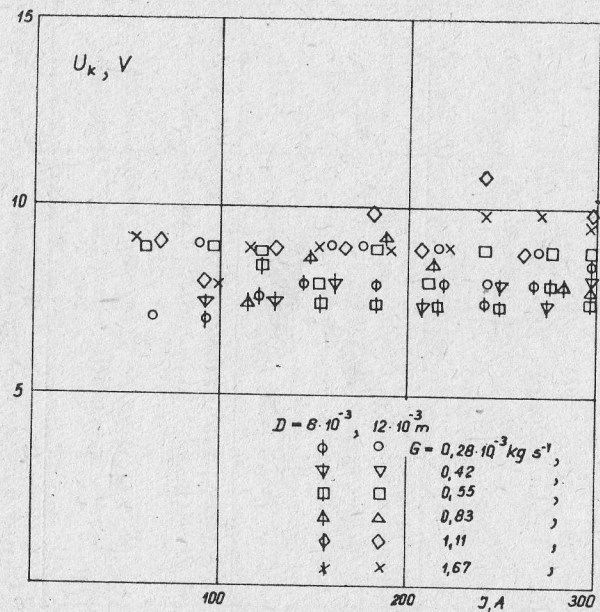
$$x_q = 320GI^{-0,38}.$$



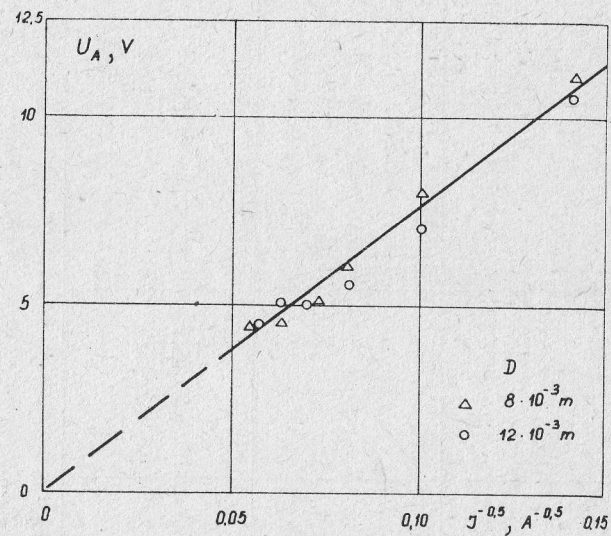
Rys. 4.18. Zależność parametru funkcji wykładniczej w równaniu energii gazu od natężenia prądu i wydanku



Rys. 4.19. Zależność zredukowanego natężenia pola elektrycznego i jednostkowego strumienia cieplnego od zredukowanej odległości od katody



Rys. 4.20. Zależność przykatodowego spadku napięcia od natężenia prądu i średnicy dyszy



Rys. 4.21. Zależność przyanodowego spadku napięcia od natężenia prądu i średnicy dyszy

Na podstawie tak ustalonych zależności empirycznych można wyznaczyć układ współrzędnych zredukowanych, w którym wyniki badań rozkładów natężenia pola elektrycznego $E=dU/dx$ i strumienia ciepła dQ/dx dla różnych średnic D dyszy, natężeń prądu I i natężeń przepływu G skupiają się wzdłuż dwóch krzywych wykazując niezbyt wielki rozrzut, co przedstawia rysunek 4.19 potwierdzający poprawność dokonanych uogólnień.

Ustalone zależności uogólnione umożliwiają wyznaczenie zasadniczych parametrów pracy podgrzewacza łukowego z dyszą segmentową zasilanego argonem. Wybór optymalnych wymiarów wymaga przyjęcia kryterium optymalizacji, którym może być sprawność energetyczna. Wymaga to jednak dodatkowo znajomości przyelektrodowych spadków napięcia. Jak wskazują na to uzyskane wyniki badań [4.56, 4.57], których wyniki zestawiono na rysunku 4.20, spadek przykatodowy ma stałą wartość

$$U_k = 8V.$$

Spadek przyanodowy uwzględniający promieniowy odcinek wyładowania wyrazić można uogólnionym równaniem empirycznym

$$U_A = 73I^{-0,5},$$

które uwzględnia wyniki uzyskane z pomiarów (rys. 4.21) [4.56]. Wyniki badań i analiza ich wyników oraz rezultaty uogólnione przedstawione w opracowaniach częściowych [4.56, 4.58] stanowią materiał do przygotowywanej rozprawy doktorskiej, która ma stanowić podsumowanie dotychczasowych prac w dziedzinie podgrzewaczy łukowych gazu prowadzonych w IMP i zarazem ich efekt końcowy.

Wykaz publikacji i opracowań naukowych

do rozdziału 2

- [2.1] Z. Zakrzewski, T. Kopiczyński, M. Lubański, J. Studnicka, M. Šicha, *Measurement of frequency of ionization waves in axial magnetic field*, Czechosl. J. Phys. **B.26**, 1976, p. 992.
- [2.2] Z. Zakrzewski, H. Murlak, *Studies of small amplitude ionization waves in an axially magnetized plasma of the helium discharge*. Prace IMP, z. 74, 1977, s. 109.
- [2.3] M. Lubański, J. Šafrankova, *Radialny rozkład koncentracji elektronów w fali jonizacji w plazmie wyładowania elektrycznego w polu magnetycznym*. Prace IMP, z. 76, 1978, s. 87.
- [2.4] H. Murlak-Stachura, *Fale jonizacji w polu magnetycznym*. Rozprawa doktorska UMCS Lublin, 1977.
- [2.5] J. Krasa, T. Kopiczyński, V. Peřina, Z. Zakrzewski, *Non-resonant interaction of coherent self-excited ionization waves in a longitudinal magnetic field*. Physica Scripta, **24**, (1981) p. 580.
- [2.6] T. Kopiczyński, Z. Zakrzewski, M. Lubański, *Eksperymentalne badania dyfuzji plazmy wyładowania elektrycznego w słabym polu magnetycznym*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 212/78.
- [2.7] Z. Zakrzewski, T. Kopiczyński, M. Lubański, *Experimental study of spatial variation of electron energy in a magnetized glow discharge plasma*. Czech. J. Phys. **30**, (1980) p. 1167.
- [2.8] T. Kopiczyński, T. Tundak, *Experimental investigation of ion current to cylindrical Langmuir probe in transition regime using microwave technique*. Prace IMP, z. 74, 1977, s. 97.
- [2.9] T. Kopiczyński, *Characteristics of negatively biased cylindrical probe at medium pressure*. Proc. 13-th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Berlin 1977, p. 99.

- [2.10] T. Kopiczyński, *Cylindryczna sonda Langmuira w stacjonarnej plazmie w przejściowym zakresie ciśnień*. Rozprawa doktorska IMP PAN (1977).
- [2.11] J. Bałka, *Program i wstępne wyniki obliczeń prądu elektronowego sondy elektrycznej w przejściowym zakresie ciśnień*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 127/77.
- [2.12] J. Bałka, T. Kopiczyński, Z. Zakrzewski, *Metoda i układ pomiarowy do szczegółowej analizy kształtu charakterystyk sondowych w plazmie*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 178/78.
- [2.13] J. Bałka, *Ocena możliwości stosowania sondy elektrycznej do pomiaru funkcji rozkładu w warunkach występowania skończonych wartości liczby Knudsen. Wybrane Zagadnienia Fizyki Plazmy*, Mat. II Konf., Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 82/957/79, s. 55.
- [2.14] M. Lubański, *Charakterystyka promieniowania izolowanej, liniowej anteny cylindrycznej w zimnej plazmie izotropowej*. Prace IMP, z. 73, 1976, s. 93.
- [2.15] M. Lubański, *Własności kierunkowe liniowej anteny w zimnej plazmie izotropowej*. Prace IMP, z. 79, 1980.
- [2.16] M. Lubański, *Własności kierunkowe anteny liniowej w plazmie izotropowej*. Wybrane Zagadnienia Fizyki Plazmy, Mat. II Konf., Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 82/957/79, s. 66.
- [2.17] T. Tundak, *Analiza teoretyczna i obliczenia numeryczne impedancji anteny liniowej w anizotropowej plazmie*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 208/79.
- [2.18] T. Tundak, *Układ do pomiaru impedancji w mikrofalowym pasmie X metodą czterech sond*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 168/78.
- [2.19] T. Tundak, *Wpływ parametrów anizotropowego ośrodka na impedancję wejściową liniowej anteny mikrofalowej*. V Konf. Mikrofalowa Elektronika Ciała Stałego, Gdańsk 1980, s. 325.
- [2.20] J. Wolińska, *Propagacja fali powierzchniowej w cylindrycznej kolumnie plazmy*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 142/80.
- [2.21] J. Wolińska-Szatowska, *Charakterystyka fazowa fali powierzchniowej w osiowo niejednorodnej kolumnie plazmy*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 238/79.
- [2.22] Z. Zakrzewski, M. Moisan, V. M. M. Glaude, C. Beaudry, P. Leprince, *Attenuation of a surface wave in an unmagnetized RF plasma column*. Plasma Physics **19**, (1977), s. 77.
- [2.23] J. Musil, J. Vyskočil, M. Lubański, *Mikrovalné měření elektronové hustoty izotropního plazmatu pomocí povrchových vln*. 1st Czechoslovak Conf. on Microwave Techniques, Pardubice May 1980, CSSR.
- [2.24] M. Moisan i in., Z. Zakrzewski, *New RF plasma sources using surface wave propagation*. Gas Discharges IEE Conf. Publ. No 143, (1976) p. 382.
- [2.25] M. Moisan, Z. Zakrzewski, *Circuit properties of a new RF plasma source (Surfatron) operating at low pressure*. Proc. 13-th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Berlin 1977 p. 349.
- [2.26] M. Moisan, Z. Zakrzewski, R. Pantel, *Theory and characteristics of surfatron*. Congress of Canadian Ass. Physicists, Phys. in Canada **34**, No 2, (1978) p. 14.
- [2.27] M. Moisan, Z. Zakrzewski, R. Pantel, *The theory and characteristics of an efficient surface wave launcher (surfatron) producing long plasma columns*. J. Phys. D.: Appl. Phys. **32**, (1979) p. 219.
- [2.28] Z. Zakrzewski, M. Moisan, *A new class of microwave sources of plasma*, Proc. of X-th Czech. Seminar on Plasma Physics and Technology, Zvikov, Czechoslovakia, (1979) p. 88.
- [2.29] Z. Zakrzewski, *Uproszczona teoria mikrofalowego generatora plazmy o strukturze falowodowej*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 71/946/79.
- [2.30] Z. Zakrzewski, *Analiza i obliczenia numeryczne mikrofalowego generatora plazmy z rezonatorem falowodowym*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 169/79.
- [2.31] Z. Zakrzewski, *Mikrofalowy generator plazmy o ponadkrytycznej koncentracji elektronów*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 120/80.
- [2.32] Z. Zakrzewski, *Wyladowanie mikrofalowe o małych rozmiarach*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 123/1017/82.
- [2.33] Z. Zakrzewski, M. Lubański, T. Kopiczyński, J. Musil, *Measurements of power transfer to overdense plasma in low-pressure microwave discharge*. 3-rd Symp. on Elementary Processes and Chemical Reactions in Low Temperature Plasmas, Acta Physica Slovaca **32**, (1982) p. 201.

- [2.34] M. Lubański, *Analiza funkcji rozkładu energii elektronów w wyladowaniu mikrofalowym w gazie*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 194/79.
- [2.35] J. Wolińska, *Przebiecie elektryczne w gazie w silnym polu mikrofal.* Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 143a/78.
- [2.36] J. Wolińska, *Ciągle wyladowanie mikrofalowe w gazie*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 143b/78.
- [2.37] M. Lubański, *Układ do badań plazmy generowanej polem mikrofalowym dużej mocy*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 91/78.
- [2.38] R. Rusakiewicz, *Metoda pomiaru i układ elektroniczny do pomiaru chwilowych charakterystyk sondy podwójnej*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 220/79.
- [2.39] Z. Zakrzewski, T. Kopiczyński, *Potencjał odosobnionego przewodnika w nieizotermicznej plazmie zawierającej jony ujemne*. Wybrane Zagadnienia Fizyki Plazmy, Mat. II Konf., Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 82/957/79, s. 126.
- [2.40] T. Kopiczyński, *Prawa podobieństwa w wyladowaniach elektrycznych*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 199/79.

do rozdziału 3

- [3.1] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski, J. Ziemann, W. Urbanik, W. Piechocki, S. Kwaśniewski, *Różnicowy anemometr laserowy RAL-1*, Sympozjum metrologii wielkości mechanicznych i kontrola jakości produkcji, Politechnika Warszawska, Warszawa 1978.
- [3.2] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, S. Kwaśniewski, D. Jonaszek, J. Wasilewski, J. Ziemann, W. Urbanik, R. Nieżorawski, K. Matsuura, *Różnicowy anemometr laserowy z cyfrowym układem obróbki sygnału*. Zesz. Nauk IMP PAN, nr 88/981/80.
- [3.3] W. Szkudliński, E. Morzyński, J. Mizeraczyk, W. Urbanik, J. Konieczka, M. Matsuura, *Frequency tracking demodulation of laser anemometer signals*. IX Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics, Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań 1980, A-39.
- [3.4] S. Kwaśniewski, J. Mizeraczyk, J. Konieczka, D. Jonaszek, W. Urbanik, J. Wasilewski, L. Makowiecki, R. Nieżorawski, *Procesor cyfrowy anemometru laserowego*. Sympozjum Metrologii, Warszawa 1980.
- [3.5] S. Kwaśniewski, J. Mizeraczyk, J. Konieczka, D. Jonaszek, R. Nieżorawski, W. Urbanik, J. Wasilewski, K. Matsuura, *Laser Doppler anemometer signal processing by counting technique*, Abstracts of IX Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań 1980, A-40.
- [3.6] S. Kwaśniewski, J. Mizeraczyk, D. Jonaszek, R. Nieżorawski, J. Konieczka, *Cyfrowy układ obróbki sygnału anemometru laserowego*. Zgłoszenie patentowe nr 66/1802/79.
- [3.7] S. Kwaśniewski, D. Jonaszek, R. Nieżorawski, J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Cyfrowy detektor paczki impulsów o skróconym czasie powrotu*. Zgłoszenie patentowe nr 66/1801/79.
- [3.8] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, S. Kwaśniewski, D. Jonaszek, R. Nieżorawski, *Cyfrowy układ obróbki sygnału anemometru laserowego*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 18/79, na zlec. Zjednoczenia OMEL Warszawa.
- [3.9] K. Matsuura, J. Mizeraczyk, W. Urbanik, Z. Wierciński, J. Konieczka, *A photon correlation technique for flow measurements by laser anemometry*. IX Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics, Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań 1980, A-41, s. 116 - 119.
- [3.10] J. Mizeraczyk, *Investigations of Longitudinal Hollow-Cathode Discharge*. Acta Physica Hungarica, vol. 54, No 1-2.
- [3.11] N. Sabotinov, N. Vutchkov, J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Dwupoljarnyj He-Cd laser z polym katodom*. Kwantowaja Elektronika, 5, 7, 1978 s. 1603 - 1604.
- [3.12] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, N. Sabotinov, N. Vutchkov, *A Hollow-Cathode He-Ne Laser*. Abstracts of VII Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics, EKON-78, Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań, 1978 s. 50 - 52.

- [3.13] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, N. Sabotinov, N. Vutchkov, *A Hollow Cathode He-Cd⁺ Laser Tube*. Digest of Reports of IX National Conf. on Coherent and Nonlinear Optics, Part I, 56, Leningrad 1978.
- [3.14] J. Mizeraczyk, D. Venzke, H. Szczepańska, *Zur Anwendung von Ähnlichkeitsparametern in zylindrischen transversalen Hohlkatodenentladungen in Ne, He und N₂*. 5. Tagung „Physik und Technik des Plasmas“, Greifswald 1980.
- [3.15] J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Laser Anemometer Measurements of Fluid Velocity*. Abstracts of VII Conf. in Quantum Electronics and Nonlinear Optics, EKON-78, Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań, 1978 s. 52 - 53.
- [3.16] J. Mizeraczyk, J. Ziemann, *Radial Profiles of Population Inversion for 632,8 nm Transition in a Hollow-Cathode Discharge*. Abstracts of VIII National Conf. on Atomic Spectroscopy, Varna, 1978 s. 64 - 65.
- [3.17] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski, *High-voltage hollow-cathode He-Cd⁺ laser*. Inter. Conf. on Lasers '80, New Orleans, USA.
- [3.18] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, *Sprawozdanie z badań laboratoryjnych wyladowania jarzeniowego w mieszaninie He-Cd w rurze wyladowczej z katodą wnąkową*. Oprac. zewn. IMP PAN nr arch. 22/78, na zlec. Zjednoczenia OMEL W-wa.
- [3.19] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski, *Sprawozdanie z badań laboratoryjnych lasera He-Cd z katodą wnąkową*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 65/80, na zlec. Zjednoczenia OMEL W-wa.
- [3.20] J. Mizeraczyk, J. Ziemann, *Cataphoresis Effects in Positive Column He-Cd Discharge*. Int. Conf. ESCAMPIG, Bratysława 1976.
- [3.21] T. Goto, H. Kano, N. Ioshino, J. Mizeraczyk, S. Hattori, *Construction of a Practical Sealed-off He-I⁺ Laser Device*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 10, 3, 292-295, 1977.
- [3.22] T. Goto, N. Ioshino, H. Kano, S. Hattori, J. Mizeraczyk, *Użytkowy model lasera He-J⁺ typu KP*. Materiały Konferencji Elektroniki Kwantowej i Optyki Nieliniowej, Instytut Fizyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań 1976.
- [3.23] J. Konieczka, *Różnicowy anemometr laserowy ze zmodyfikowanym układem detekcji*. Materiały Konferencji Elektroniki Kwantowej i Optyki Nieliniowej, Instytut Fizyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań 1976.
- [3.24] J. Konieczka, J. Mizeraczyk, S. Kwaśniewski, *Różnicowy anemometr laserowy do pomiaru przepływu cieczy i gazów*. III Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1978 s. 69 - 71.
- [3.25] K. Rozsa, J. Bergon, M. Janossy, J. Mizeraczyk, *Effect of Anode Geometry and Potential on Voltage of a Hollow Cathode Discharge*. Reports of Central Research Institute for Physics, Budapest, KFKI-1979/15.
- [3.26] J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Optyczna diagnostyka przepływów za pomocą anemometru laserowego*. Międzynarodowa Szkoła Koherentnej Optyki i Holografii, Praga 1980.
- [3.27] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski, W. Urbanik, K. Rozsa, P. Telbizow, *Performance of hollow-cathode He-I⁺ laser with internal anode system*. IX Conf. on Quantum Electronics and Nonlinear Optics, Institute of Physics, A. Mickiewicz University, Poznań 1980, A-42, s. 119 - 120.
- [3.28] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski *Performance of hollow-cathode He-Cd⁺ laser with internal anode system*. X National Conf. on Lasers and Nonlinear Optics, Kiev 1980.
- [3.29] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, *Studia nad wyladowaniem jarzeniowym w rurze wyladowczej z katodą wnąkową i założenia dla prób laboratoryjnych*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 129/76 na zlec. Zjednoczenia OMEL w Warszawie.
- [3.30] J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Studia i opracowanie założeń różnicowego anemometru laserowego*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 130/76, na zlec. Zjednoczenia OMEL w Warszawie.
- [3.31] J. Mizeraczyk, J. Konieczka, W. Urbanik, *Sprawozdanie z badań laboratoryjnych wyladowania jarzeniowego w helu w rurze wyladowczej z katodą wnąkową*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 206/77, na zlec. Zjednoczenia OMEL w Warszawie

- [3.32] J. Konieczka, J. Łunkiewicz, J. Mizeraczyk *Projekt różnicowego anemometru laserowego*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 208/77, na zlec. Zjednoczenia OMEL w Warszawie.
- [3.33] J. Wasilewski, J. Konieczka, J. Mizeraczyk, *Projekt anemometru laserowego RAL-2*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 32/79, na zlec. Zjednoczenia OMEL w Warszawie.
- [3.34] J. Mizeraczyk, H. Szczepańska, J. Konieczka, J. Ziemann, J. Wasilewski, W. Urbanik, *Badania wyladowania jarzeniowego z punktu widzenia procesu azotowania*. Materiały IV Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Zastosowanie niskotemperaturowej plazmy w przemyśle”, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1979.
- [3.35] J. Mizeraczyk, H. Szczepańska, J. Konieczka, W. Urbanik, J. Wasilewski, *Sprawozdanie z przeprowadzenia wstępnych badań elektrycznego wyladowania jarzeniowego w azocie z punktu widzenia procesu azotowania*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 215/78, na zlec. Politechniki Częstochowskiej.
- [3.36] H. Szczepańska, J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Ziemann, J. Wasilewski, W. Urbanik, *Sprawozdanie z badania wyladowania jarzeniowego z punktu widzenia procesu azotowania*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 255/79, na zlec. Politechniki Częstochowskiej.
- [3.37] D. Venzke, H. Szczepańska, *Zur Besetzung der Rotationsniveaus im anisothermen Ar-N₂ - Plasma*. 5 Tagung „Physik und Technik des Plasmas”, Greifswald 1980.
- [3.38] S. Ginal, *Opis stanowiska do azotowania w wyladowaniu jarzeniowym*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 213/77, na zlec. Politechniki Częstochowskiej.
- [3.39] H. Szczepańska, *Azotowanie w wyladowaniu jarzeniowym (opracowanie przeglądowe)*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 107/77, na zlec. Politechniki Częstochowskiej.
- [3.40] H. Szczepańska, J. Mizeraczyk, W. Urbanik, *Sprawozdanie z badań parametrów wyladowania jarzeniowego w azocie z domieszką wodoru*. Oprac. zewn. IMP PAN, nr arch. 234/80, na zlec. Politechniki Częstochowskiej.
- [3.41] H. Szczepańska, J. Mizeraczyk, J. Konieczka, J. Wasilewski, W. Urbanik, *Badanie wyladowania jarzeniowego stosowanego w procesie azotowania jonowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 45/81.

do rozdziału 4

- [4.1] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy*. Zgłoszenie patentowe W 59326, W 62243, W 60764.
- [4.2] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy*, Materiały z konferencji Instytutu Lotnictwa nt. „Miernictwo dynamicznych wielkości mechanicznych”, Warszawa 1976.
- [4.3] J. Śmigielski, *Linearyzacja wskazań pływakowego przepływomierza elektromagnetycznego*. Biuletyn IMP PAN, nr 160/829/1976.
- [4.4] J. Śmigielski, *Analiza zależności wskazań elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego od warunków pracy*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 135/77.
- [4.5] J. Śmigielski, *Dobór optymalnych wymiarów elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 180/77.
- [4.6] J. Śmigielski, *Charakterystyki hydrodynamiczne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 121/78.
- [4.7] J. Śmigielski, *Analiza powstawania błędów wskazań elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 134/78.
- [4.8] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczne pływakowe przetworniki wydatku i ciśnienia*. PWN, Warszawa—Poznań 1980.
- [4.9] J. Śmigielski, *Analiza wpływu parametrów geometrycznych na charakterystyki układu dwóch cewek z rdzeniem w elektromagnetycznym przepływomierzu pływakowym*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 109/78.
- [4.10] A. Jaworek, *Charakterystyki statyczne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 42/908/78.

- [4.11] J. Śmigielski, K. Polak, *Charakterystyki hydrodynamiczne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Materiały z konferencji Instytutu Metrologii i Budowy Przyrządów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1978.
- [4.12] J. Śmigielski, *Elektryczny przetwornik natężenia przepływu i różnicy ciśnień*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 114/1022/80.
- [4.13] A. Jaworek, *Błędy pomiaru elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 73/964/79.
- [4.14] J. Śmigielski, *Ogólne zasady doboru optymalnych proporcji elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 216/79.
- [4.15] J. Śmigielski, *Linearization of Characteristics of Electromagnetic Float Flowmeter*. Bull. L'Acad. Pol. des Sci. Techn., XXVII, No. 10-11 (1979).
- [4.16] J. Śmigielski, *Electromagnetic Float Flowmeter with Magnetic Suspension*. Bull. L'Acad. Pol. des Sci. Techn., XXVIII, No. 1-2 (1980).
- [4.17] A. Jaworek, *Parametry dynamiczne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 133/78.
- [4.18] H. Kućmierz, *Optimalizacja konstrukcji oraz kompensacja termiczna cewki zasilającej elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. ZD ZAMPAN, 1979.
- [4.19] H. Kućmierz, *Badania konstrukcji cewki pomiarowej elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. ZD ZAMPAN, 1979.
- [4.20] A. Jaworek, *Wpływ wyższych harmonicznych na dokładność pomiaru przetwornikami transformatorowymi*. Prace IMP, z. 82, 1982.
- [4.21] A. Jaworek, *Badanie parametrów układu cewki z rdzeniem dla celów zawieszenia magnetycznego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 225/79.
- [4.22] A. Jaworek, *Źródła błędów elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego i możliwości ich eliminacji*. Materiały z konferencji Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977.
- [4.23] A. Jaworek, *Kompensacja błędu spowodowanego zmianami napięcia zasilania przy pomiarach elektromagnetycznym przepływomierzem pływakowym*, Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 4/879/77.
- [4.24] A. Jaworek, *Współpraca elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego z obciążeniem o zmiennej oporności*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 34/902/78.
- [4.25] A. Jaworek, *Pomiar fazy w transformatorowych przetwornikach pomiarowych*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 38/904/78.
- [4.26] A. Jaworek, *Układy pomiarowe elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Materiały z konferencji Instytutu Metrologii i Budowy Przyrządów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1978.
- [4.27] H. Kućmierz, *Układ elektroniczny elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. ZD ZAMPAN, 1979.
- [4.28] A. Jaworek, J. Ziemann, *Układy zasilające i pomiarowe elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 156/80.
- [4.29] A. Jaworek, J. Ziemann, *Zasilacz stabilizowany napięcia i prądu zmiennego*, Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 171/79.
- [4.30] H. Kućmierz, *Układ stabilizacji prądu zmiennego do zasilania elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. ZD ZAMPAN, 1979.
- [4.31] J. Śmigielski, *Opis konstrukcji elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego do pomiaru małych wydatków powietrza*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 149/78.
- [4.32] K. Polak, *Eksperymentalna weryfikacja przepływu powietrza przez elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy dla małych natężeń przepływu*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 70/947/79.
- [4.33] K. Polak, *Opis konstrukcji elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego do pomiaru małych wydatków*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 189/78.
- [4.34] K. Polak, *Weryfikacje eksperymentalne modelu obliczeniowego przepływu wody przez szczelinę pierścieniową elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 62/80.

- [4.35] A. Jaworek, *Ogólna analiza powstawania i metod redukcji błędów przetwarzania elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 155/80.
- [4.36] J. Śmigielski, *Elektryczny przetwornik różnicy ciśnień*. Zgłoszenie patentowe W 58746.
- [4.37] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczny przetwornik ciśnienia*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 74/77.
- [4.38] A. Jaworek, K. Polak, *Wyniki badań modeli elektromagnetycznego przetwornika ciśnienia*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 242/78.
- [4.39] S. Ginal, J. Kielbiński, *Wytyczne i modyfikacja konstrukcji technologii elektromagnetycznego przetwornika ciśnienia*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 245/78.
- [4.40] J. Śmigielski, *Electromagnetic Float Transducer of Pressure Difference*. Bull. L'Acad. Pol. Sc. Tech., XXIX, No. 1-2 (1981).
- [4.41] J. Śmigielski, *Fotoelektryczny przetwornik poziomu cieczy*. Zgłoszenie patentowe P 187311.
- [4.42] A. Jaworek, *Elektroniczny układ stabilizacji strumienia świetlnego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 12/873/77.
- [4.43] J. Śmigielski, *Elektryczny oporowy przetwornik różnicy ciśnień*. Zgłoszenie patentowe P 023533.
- [4.44] J. Śmigielski, *Elektryczny oporowy przetwornik poziomu cieczy w manometrze*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 86/77.
- [4.45] A. Jaworek, *Właściwości metrologiczne rezystancyjnego przetwornika różnicy ciśnień*. Prace IMP, z. 81, 1981.
- [4.46] A. Jaworek, *Opis techniczny układu pomiarowego rezystancyjnego przetwornika różnicy ciśnień*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 204/78.
- [4.47] H. Szczepańska, J. Kielbiński, *Wytyczne konstrukcji rezystancyjnego przetwornika ciśnienia*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 233/78.
- [4.48] A. Jaworek, *Badanie podstawowych parametrów metrologicznych rezystancyjnego przetwornika różnicy ciśnień*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 240/78.
- [4.49] J. Śmigielski, *Elektryczny przetwornik gęstości przepływającego gazu*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 127/79.
- [4.50] J. Śmigielski, *Sposób i urządzenie do pomiaru gęstości gazu*. Zgłoszenie patentowe P 223403.
- [4.51] H. Szczepańska, *Oddziaływanie poprzecznego wirującego pola magnetycznego z wyladowaniem w podgrzewaczu łukowym gazu*. Rozprawa doktorska, IMP PAN, Gdańsk 1977.
- [4.52] S. Ginal, *Wpływ poprzecznego wirującego pola magnetycznego na pracę podgrzewacza łukowego gazu z dyszą segmentową*. Biuletyn IMP PAN, nr 175/658/76.
- [4.53] H. Szczepańska, *Oddziaływanie wirującego poprzecznego pola magnetycznego na wyladowanie w podgrzewaczu łukowym gazu*. Materiały Konferencyjne Zjazdu Naukowego Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Łódź 1978.
- [4.54] A. N. Timoszewskij, A. S. Wasilkowska, S. Ginal, J. Dundr, W. A. Rudakowa, *Issledowanie raspriedielenija temperatur i skorosti w plazmiennych strujach*. VII Wsiesojuz. Konf. po Gienieratoram Nizkotiemp. Plazmy, Alma-Ata 1977.
- [4.55] S. Ginal, *Procesy elektrotermiczne w podgrzewaczu łukowym gazu z dyszą segmentową*. Prace IMP, z. 80, 1981.
- [4.56] S. Ginal, *Uogólnienie dotychczasowych wyników badań doświadczalnych podgrzewaczy łukowych z dyszą segmentową*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 177/80.
- [4.57] S. Ginal, *Zbadanie przyanodowego spadku napięcia w podgrzewaczu łukowym gazu z dyszą segmentową*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 126/79.
- [4.58] S. Ginal, *Uproszczony model matematyczny wyladowania elektrycznego w dyszy segmentowej podgrzewacza łukowego*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 222/79.
- [4.59] S. Ginal, *Uproszczony model matematyczny zamiany energii elektrycznej na ciepłą gazu w podgrzewaczu łukowym z dyszą segmentową*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr arch. 161/80.