

O3

Zagadnienia techniki plazmowej i laserowej

Problems of plasma and laser engineering

W 2003 r. w ramach działalności statutowej realizowano 5 tematów badawczych obejmujących wytwarzanie, badanie właściwości i praktyczne zastosowania ośrodków zjonizowanych i promieniowania laserowego do celów technicznych i ekologicznych. Poza działalnością statutową realizowano inne projekty badawcze dotyczące tej samej tematyki, finansowane przez KBN i FNP. Część badań realizowana była w ramach współpracy międzynarodowej.

W trzech Zakładach (Z1-Z3) realizowano następujące tematy statutowe: O3/Z1/T1 Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym (kier. – prof. Z. Zakrzewski),

O3/Z2/T1 Charakterystyki aplikacyjne intensywnych wiązek laserów technologicznych (kier. – doc. G. Śliwiński),

O3/Z2/T2 Badania doświadczalne wymiany energii oraz emisji w matrycach stałych (kier. – doc. G. Śliwiński),

O3/Z3/T1 Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów i mikroobróbki materiałów (kier. – prof. J. Mizeraczyk),

O3/Z3/T2 Zastosowanie techniki plazmowej do oczyszczania gazów odłotowych (kier. – prof. J. Mizeraczyk).

O3/Z1/T1 Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym

Celem prowadzonych od wielu lat prac w ramach tego tematu są bada-

In the frame of statute activities in 2003 realised have been 5 research topics encompassing production, investigations of properties and practical application of ionised media and laser radiation for technical and ecological purposes. Apart from statute activities realised have been other research projects regarding the same topics, which have been financed by the KBN and FNP. A part of investigations has been realised in the frame of international cooperation.

In 3 divisions (Z1-Z3) realised have been the following statute activities:

O3/Z1/T1 Generation and modelling of plasma in microwave discharges (led by Prof. Z. Zakrzewski),

O3/Z2/T1 Application characteristics of intense beams of technological lasers (led by Dr G. Śliwiński, PhD, DSc),

O3/Z2/T2 Experimental investigations of energy exchange and emissions in solid matrices (led by Dr G. Śliwiński, PhD, DSc),

O3/Z3/T1 Application of laser technique for flow visualisation and material microprocessing (led by Prof. J. Mizeraczyk),

O3/Z3/T2 Application of plasma technology for purification of flue gases, (led by Prof. J. Mizeraczyk).

O3/Z1/T1 Generation and plasma modelling in microwave discharge

The objective of activities within that topic, undertaken for several years

nia i doskonalenie mikrofalowych generatorów plazmy. Wszystkie prace prowadzone w 2003 r. dotyczyły wyładowań i generatorów plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym.

Jednym z ważnych osiągnięć Zakładu jest przeprowadzona w okresie sprawozdawczym gruntowna rozbudowa i modernizacja bazy eksperymentalnej. Realizacja tego zadania stała się możliwa dzięki finansowaniu i bezpośrednim dostawom sprzętu przez koncern Air Liquide (Francja). W rezultacie dysponujemy kilkoma niezależnymi stanowiskami badania i użytkowania mikrofalowych generatorów plazmy, wyposażonymi w układy zasilania, kontroli i pomiaru wydatku mocy mikrofal, gazów roboczych i czynnika chłodzącego.

Główny wysiłek zespołu włożono w wykonanie prac związanych z opracowaniem, badaniem i optymalizacją mikrofalowych źródeł plazmy. Ta, planowana na kilka lat tematyka, realizowana jest w ramach działalności statutowej i kontraktu z Air Liquide, (AL): *Badania fizycznych podstaw działania i opracowanie metod projektowania i optymalizacji mikrofalowych źródeł plazmy.*

Prace dotyczą generacji plazmy w mieszaninach gazowych pod ciśnieniem atmosferycznym. Celem ich jest optymalizacja istniejących i opracowanie nowych, doskonalszych mikrofalowych generatorów plazmy stosowanych w przemysłowych reaktorach do destrukcji szkodliwych odpadów gazowych powstających w wyniku procesów technologicznych. Zakres prac obejmuje:

now, are investigations and improvement of microwave plasma generators. All works conducted in 2003 regarded discharges and plasma generators under atmospheric pressure.

One of the important achievements of the division within the reporting year was a fundamental modernisation and extension of experimental facilities. Such realisation became possible due to financing and direct supplies of equipment by the Air Liquide company (France). In effect, at our disposal at the moment are several independent research rigs for investigations and application of microwave plasma generators, equipped with supplying systems, control and measurements of the microwave power output, working media and cooling medium.

The major effort of the group has been put in performing works connected with a development, investigations and optimisation of microwave plasma sources. Such scope of activities, planned for several years to come, is realised in the frame of statute activities and a contract with Air Liquide (AL) titled: Investigations of physical foundations of operation and development of design and optimisation methods of microwave plasma source.

The works regard plasma generation in gaseous mixtures under atmospheric pressure. Their aim is optimisation of existing and development of new, better microwave plasma generators used in industrial reactors for destruction of harmful gaseous waste formed during technological processes. The scope of

- diagnostykę i fizyczne modelowanie wytwarzanej plazmy,
- badania elektrodynamicznych charakterystyk generatorów,
- analizę efektywności transferu mocy mikrofal do plazmy i stabilności pracy generatorów,
- analizę wpływu warunków wyładowania oraz czynników geometrycznych na czas przebywania w wyładowaniu składników mieszaniny gazowej oraz na przebieg procesów chemicznych.

W wyniku tych prac powstają nowatorskie konstrukcje generatorów plazmy, przekazywanych kontrahentowi, który po opracowaniu wersji przemysłowych wdraża je w praktyce.

W 2003 roku opracowaliśmy dwa typy generatorów o konstrukcji falowodowej (RW TIAGO i RW – *surfaguide*). AL rozpoczął wdrażanie procedury patentowej w obu przypadkach. Ze względu na warunki kontraktu z AL, uzyskane wyniki zostały przedstawiane w kilkunastu poufnych raportach IMP PAN i zostaną opublikowane w przyszłości. Wyniki eksperymentalnych badań elektrodynamicznych parametrów mikrofalowej pochodni plazmowej przedstawiono na międzynarodowej konferencji w Tuluzie.

Eksperymentalne prace w zakresie badania fizycznych mechanizmów wyładowań skoncentrowane były na badaniach wyładowania impulsowego. Badano rozwój w czasie i przestrzeni wyładowań podtrzymywanych przez elektromagnetyczne fale powierzchniowe w ru-

works encompass:

- *Diagnostics and physical modeling of produced plasma,*
- *Investigations of electrodynamic characteristics of generators,*
- *Analysis of the effectiveness of transfer of microwave power to plasma and stability of generator operation,*
- *Analysis of the influence of discharge conditions and geometrical factors on the time of residence within the discharge of the gaseous mixture components as well as on the course of chemical processes.*

As a result of these works there appear novel designs of plasma generators, which are conveyed to the contracting institution, who, following the preparation stage for industrial version, implements them in practice.

In 2003 developed have been two types of generators with waveguide structure (RW TIAGO and RW – surfaguide). AL started implementation of patent procedure in both cases. Due to the conditions of the contract with AL the obtained results have been presented in several confidential internal reports and will be published in future. The results of experimental investigations of electrohydrodynamical parameters of microwave plasma torch have been presented at international conference in Toulouse, France.

Experimental activities in the frame of investigations of physical mechanisms of discharges have been concen-

rach kapilarnych. Fale wzbudzano aplikatorem pola typu surfaguide. Parametry impulsów mocy mikrofal były następujące: częstotliwość pracy 2.45 GHz, czas trwania impulsów w zakresie ms, moc szczytowa do 1 kW. Między innymi uzyskano po raz pierwszy rezultaty eksperymentalne umożliwiające wyjaśnienie czasowego rozwoju wyładowania pod ciśnieniem atmosferycznym. Wyniki zostały zgłoszone do prezentacji na konferencji międzynarodowej w Tuluzie i przedstawione w raporcie IMP, a ponadto są przygotowywane do publikacji.

Prowadzono także eksperymentalne badania mikrofalowej pochodni plazmowej w warunkach pracy impulsowej. Opracowaną metodykę optymalizacji elektrodynamicznych charakterystyk takich wyładowań przedstawiono na konferencjach międzynarodowych w Mińsku i Kudowie-Zdroju.

Część prac wykonywanych w ramach tego tematu dotyczyła zastosowań wyładowań mikrofalowych w ochronie środowiska. Prace te, koordynowane przez prof. Mizeraczyka, prowadzone były w przeważającej części jako zadania tematu O3/Z3/T2 i zostały szczegółowo omówione w odpowiedniej części sprawozdania.

W okresie sprawozdawczym opublikowano wyniki dotyczące zastosowania wyładowania mikrofalowego typu torch do dekompozycji lotnych związków organicznych w tym freonów oraz tlenków azotu. Na bazie zdobytych doświadczeń zaproponowano praktyczny system dekompozycji substancji szkodliwych i

trated on investigations of impulse discharges. Investigated has been the spatial and time development of discharges sustained by electromagnetic surface waves in capillary pipes. The waves have been induced by means of a field applicator of the surfaguide type. The impulse parameters were as follows: operation frequency 2.45 GHz, time of impulse persistence in the range of μ s and ms, peak power up to 1 kW. Amongst the others obtained have been for the first time the experimental results enabling explanation of time development of the discharge under atmospheric pressure. The results have been submitted for consideration at international conference in Toulouse, France as well as presented in the IFFM internal report, as well as a in preparation stage for publishing.

Conducted also have been experimental investigations of microwave plasma torch under impulse operation. Developed methodology of optimisation of electrohydrodynamical characteristics of such discharges has been presented at international conferences in Minsk, Byelorussia and Kudowa-Zdrój, Poland.

Part of activities undertaken in the frame of that topic regarded applications of microwave discharges in environmental protection. Such works, coordinated by Professor Mizeraczyk, performed have been grossly within the topic O3/Z3/T2 and have been appropriately reported in the relevant part of the report.

In the reporting year published have

neutralizowania produktów końcowych tego procesu. Uzyskano pozytywne rezultaty. Stopień dekompozycji oraz wydajność energetyczna rozkładu substancji szkodliwych są, w przypadku wyładowania mikrofalowego typu *torch*, lepsze niż uzyskiwane za pomocą innych metod plazmowych. Uzyskane wyniki dekompozycji opublikowano w czasopiśmie, przedstawiono na konferencji międzynarodowej w Niemczech i zgłoszono do prezentacji na konferencji międzynarodowej w 2004 r. w Padwie.

W roku 2003 obroniona została praca doktorska, obejmująca wyniki prowadzonych badań dekompozycji wybranych substancji szkodliwych z zastosowaniem wyładowania mikrofalowego typu *torch*. Ukazał się również artykuł w *J. Appl. Phys.* dotyczący badań rozkładu związków fluoru, wykonanych wcześniej w ramach współpracy z Uniwersytetem Montrealskim.

Wykonano wstępne badania dekompozycji tlenków azotu w mikrofalowej pochodni plazmowej zasilanej impulsowo.

Numeryczne modelowanie plazmy dotyczyło wyładowań mikrofalowych typu płomień plazmowy oraz podtrzymywanych falą powierzchniową, ciągłych i impulsowych, w gazach o ciśnieniu atmosferycznym.

Kontynuowano prace nad globalnym numerycznym modelem impulsowego wyładowania mikrofalowego typu pochodnia plazmowa w azocie. Dotyczyły one zarówno identyfikacji procesów zderzeniowych mających istotny wpływ na dynamikę plazmy wyłado-

been the results regarding application of microwave discharge of the 'torch' type for decomposition of volatile organic compounds including freons and nitrogen oxides. On the basis of acquired expertise postulated has been a practical system for decomposition of harmful substances and neutralisation of final products of such process. Positive results have been obtained. The degree of decomposition as well as energetic efficiency of harmful substances decomposition are, in the case of microwave discharge of the 'torch' type, better than those obtained by means of other plasma methods. Obtained results of decomposition have been published in journals, presented at international conference in Greifswald, Germany and submitted for presentation at international conference in 2004 in Padova, Italy.

In 2003 defended has been a doctoral dissertation, which included the results of conducted investigations into decomposition of selected harmful substances with application of the microwave discharge of the 'torch' type. There also appeared a paper in J. Appl. Phys. pertaining to the investigations of decomposition of fluoride compounds, realised earlier in cooperation with University of Montreal.

Conducted have been preliminary investigations of decomposition of nitrogen oxides in microwave plasma torch fed in the impulse way.

Numerical plasma modelling regarded microwave discharges of the plasma flame type sustained by means of sur-

wania, jak też zdefiniowania spójnego zbioru współczynników szybkości tych procesów. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w dwóch referatach konferencyjnych i w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN.

Rozpoczęto prace nad spójnym dwuwymiarowym modelem numerycznym stacjonarnego wyładowania typu pochodnia plazmowa. W pierwszej fazie przetestowano obliczanie rozkładów pola elektrycznego w obszarze wyładowania dla założonego rozkładu przestrzennego przewodności u wylotu współosiowego źródła plazmy. Wyniki przedstawiono w referacie konferencyjnym.

W ramach badań nad propagacją fali elektromagnetycznej w przewodnicach zawierających plazmę przeprowadzono analizę numeryczną propagacji fali w kolumnie plazmy o przekroju pierścieniowym, wyznaczono charakterystyki propagacji i rozkłady pola elektromagnetycznego. Wykazano, że w takiej strukturze mogą rozchodzić się dwie fale powierzchniowe, z których każda związana jest z inną powierzchnią rozdziału plazma-dielektryk. Wyniki przedstawiono na francusko-polskim seminarium i opublikowano w *High Temp. Mat. Proc.*

Kontynuacją badań prowadzonych wcześniej było opublikowanie wyników obliczeń przestrzennych rozkładów parametrów plazmy wyładowania w azocie podtrzymywanego falą powierzchniową i porównania ich z odpowiednimi rozkładami dla argonu. Kolejnym krokiem w modelowaniu plazmy takiego wyładowania jest rozszerzenie badań

face wave, continuous and impulse, in gases under atmospheric pressure.

Continued have been works on a global numerical models of impulse micro-wave discharge of the plasma torch type in nitrogen. These regarded both identification of collision processes bearing a significant influence on the plasma dynamics as well as definition of a coherent set of rate coefficients of these processes. The results of numerical calculations have been presented in two conference papers as well as in the IFFM internal report.

The activities have started on a consistent two-dimensional numerical model of a stationary discharge of the plasma torch type. In the first phase tested have been calculation of electrical field distribution in the area of discharge for a considered spatial distribution of conductivity at outlet from the symmetrical plasma source. The results have been presented in the conference paper.

*In the frame of works on propagation of electromagnetic wave in a slide-way containing plasma conducted has been numerical analysis of wave propagation in the plasma column with annular cross-section, determined have been propagation characteristics and distributions of electromagnetic field. It has been proved that within such structure there can propagate two surface waves, where each is related to a different plasma-dielectric separation surface. The results have been presented at a French-Polish seminar and published in *High Temp. Mat. Proc.**

A continuation of works conducted

na wyładowania impulsowe. Wstępne wyniki dotyczące takiego wyładowania w argonie zostały przedstawione w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN. Wzrost mocy doprowadzonej do wyładowania podtrzymywanego falą powierzchniową prowadzi zarówno do zwiększenia lokalnej gęstości plazmy jak też do zwiększenia jej rozmiarów liniowych. W rezultacie uproszczona analiza lokalna nie zawsze jest możliwa. W ogólnym przypadku konieczna jest przestrzenno-czasowa analiza zmian zachodzących w całym wyładowaniu. Elementem przygotowań do takiej analizy jest przegląd postulowanych mechanizmów rozwoju plazmy wyładowania podtrzymywanego falą powierzchniową i jakościowy opis zmian parametrów kolumny plazmy takiego wyładowania przy pobudzeniu impulsowym.

Całokształt realizowanych w Zakładzie prac nad modelowaniem plazmy wyładowań mikrofalowych przedstawiono w referacie wygłoszonym w Instytucie Technologicznym i Nuklearnym (ITN) w Sacavm w Portugalii. Zakład współpracuje z grupą dr Pinhao z ITN przy rozwijaniu biblioteki numerycznej PLASMAKIN przeznaczonej do wspomagania i automatyzacji operacji na danych fizycznych i chemicznych przy modelowaniu plazmy wyładowań w mieszaninach gazów. Liczba procesów zderzeniowych i reakcji chemicznych, jakie należy uwzględnić w realistycznych modelach numerycznych plazmy takich wyładowań, sięga setek. Operacje związane z wypisywaniem równań szybkości reakcji, przeliczaniem

earlier was publishing of the results of spatial calculations of distributions of plasma parameters of discharge in nitrogen sustained by a surface wave and their comparison with adequate distributions for argon. A subsequent step in plasma modelling of such discharge was extension of investigations on the impulse discharges. Preliminary results representing such discharge in argon have been presented in the IFFM internal report. Increase of power supplied to the discharge sustained by the surface wave leads to both the increase of local plasma density as well as increase of its linear dimensions. In effect a simplified local analysis is not always possible. In a general case a spatial and time analysis is required of the changes taking place in the entire discharge. The element of preparation for such analysis is the survey of postulated mechanisms of plasma development sustained by the surface wave and a qualitative description of changes of plasma column parameters of such discharge during impulse excitation.

The entirety of works realised in the division on the modelling of plasma of microwave discharge have been presented in the paper presented in the Technological and Nuclear Institute (ITN) in Sacavm in Portugal. The division cooperates with a group led by Dr Pinhao from ITN in the development of the numerical library PLASMAKIN for aiding and automation of operations on physical and chemical data during modelling of plasma discharges in gaseous mixtures. The number of collision processes

współczynników etc. są etapem programowania obarczonym zazwyczaj największą ilością błędów, trudnych do wykrycia ze względu na swoją naturę. To stanowi o wielkiej przydatności rozwijanej biblioteki. Aktualne problemy współpracy oraz wprowadzone i planowane rozszerzenia oprogramowania PLASMAKIN zostały przedstawione w referacie wygłoszonym podczas pobytu dr Pinhao w IMP PAN.

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Badania w ramach tematu O3/Z1/T1 wykonywane były w powiązaniu z pracami prowadzonymi w ramach tematu statutowego O3/Z3/T2, projektów badawczych KBN 1124 *Rozwój i doskonalenie mikrofalowych technik eliminacji gazów szkodliwych dla środowiska* i KBN 1179 *Opracowanie numerycznego modelu plazmy wyladowania impulsowego*, kontraktu z Air Liquide (Francja) *Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas*, a także we współpracy z instytucjami w Kanadzie, Niemczech, Republice Czech, Francji i Portugalii.

O3/Z2/T1. Charakterystyki aplikacyjne intensywne wiązek laserów technologicznych

Zakończono cykl badań mających na celu opracowanie metody doświadczalnego wyznaczania parametrów wiązek promieniowania laserów CO₂ du-

and chemical reactions, which must be considered in realistic numerical models of plasma of such discharges reaches hundreds. Operations are connected with prescription of reaction rate equations, recalculation of coefficients, etc. It is a stage of calculations introducing a highest number of errors, difficult to be detected due to their nature. This should confirm a high applicability of developed library. Present problems of cooperation together with introduced and planned extensions of the PLASMAKIN software have been presented in the paper presented during the stay of Dr Pinhao at IFFM PAS.

Links with other research topics

Investigations in the frame of the topic O3/Z1/T1 have been performed in combination with the works from the statute activity O3/Z3/T2, KBN-1124 research projects Development and improvement of microwave techniques for elimination of environmentally harmful gases and KBN 1179 Development of a numerical model of plasma od impulse discharge, external contract with Air Liquide (France) Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas as well as cooperation with institutions in Canada, Germany, Czech Republic, France and Portugal.

O3/Z2/T1. Application characteristics of intense beams of technological lasers

Completed has been a series of in-

żej mocy. Założono, że metoda powinna umożliwiać pełny opis własności wiązki lasera w oparciu o dane uzyskane wprost z doświadczenia. Badania wykonano dla prototypów laserów przepływowanych serii MLT. Warunkiem rozwiązania tak określonego problemu było opracowanie i zastosowanie właściwego sposobu pomiaru parametrów promieniowania lasera. Parametry wyznaczano w oparciu o próbkowanie zależnych od czasu, lokalnych wartości natężenia pola promieniowania w przekroju poprzecznym wiązki. Poprawność przyjętej metody badań wykazano poprzez pełny opis własności promieniowania, na przykładzie wiązek generowanych przez lasery MLT. Ponadto, zastosowano opracowaną metodę do zbadania związków pomiędzy wielkościami opisującymi ośrodek aktywny i układy optyczne laserów technologicznych MLT1200 i MLT2500, a parametrami promieniowania generowanego przez te lasery. Wyniki zebrano w rozprawie doktorskiej M. Sawczaka.

Uzyskano również szereg nowych wyników doświadczalnych, dotyczących stosowania w badanych laserach układów optyki adaptacyjnej. Pozwalają one na dynamiczny wybór parametrów wiązki laserowej oraz na kompensację niepożądanych efektów termicznych występujących w elementach optycznych lasera.

Przeprowadzono pomiary interferometryczne odkształceń termicznych elementów transmisyjnych ZnSe, standardowo stosowanych w laserach technologicznych CO₂. Na podstawie wyników

vestigations aimed at development of a method of experimental determination of the parameters of the radiation beams of cw CO₂ lasers. It has been assumed that the method should enable a full description of the properties of a laser beam based on data acquired directly from the experiment. Investigations have been performed for the prototype flow lasers from MLT series. A condition for a solution to a problem postulated in such a way was a development and implementation of a specific procedure of measurement of the parameters of laser radiation. The parameters have been determined based on time dependent sampling, local values of radiation field intensity in the beam cross-section. The adequacy of such investigation method has been proved through a full description of radiation properties on the basis of beams generated by MLT lasers. Additionally, the developed method has been applied in investigations of relations between the quantities describing the active medium and optical systems of technological lasers MLT1200 and MLT2500, and parameters of radiation generated by such lasers. The results have been collected in the doctoral dissertation M. Sawczak's.

Obtained also have been a series of new experimental results regarding application of the systems of adaptive optics in investigated lasers. These enable a dynamical selection of parameters of the laser beam as well as compensation of unwanted thermal effects taking place in optical elements of the laser.

Performed have been interferome-

oceniono poziom termicznych deformacji okien ZnSe w funkcji mocy padającego promieniowania i ich wpływu na charakterystyki wiązki zarówno w polu bliskim jak i dalekim.

Zbadano doświadczalnie możliwości korekcji deformacji termicznych przy użyciu zwierciadła zmiennie ogniskowego, sterowanego zmianami ciśnienia hydrostatycznego. Wykazano możliwość pełnej korekcji, zależnego od mocy, efektu termicznego soczewkowania elementów optycznych lasera, a tym samym możliwość dynamicznej optymalizacji charakterystyk wiązki w strefie obróbki.

Opracowano i zastosowano w obliczeniach model numeryczny, opisujący transformację wiązki promieniowania laserowego w wieloelementowych układach optycznych transmisji promieniowania od źródła laserowego do strefy oddziaływania promieniowania z materiałem. Model umożliwia określenie wpływu charakterystyk zwierciadła adaptacyjnego umieszczonego w torze wiązki na warunki jej ogniskowania (parametr jakości wiązki, wymiar i położenie ogniska) w zależności od parametrów wiązki źródłowej, geometrii toru optycznego oraz lokalizacji zwierciadła. Wyniki przedstawiono w opracowaniach i referatach konferencyjnych.

W badaniach plazmy wyładowań dla laserów wyznaczono metodą Monte Carlo parametry obszarów elektromagnetycznych w azocie, oraz zbadano teoretycznie nowy sposób wzbudzania laserów CO₂ przy użyciu wyładowania barierowego, przydatnego również do se-

tric measurements of thermal deflections of ZnSe transmission elements, which are usually used in technological cw CO₂ lasers. On the basis of results determined has been the level of thermal deformations of ZnSe windows in function of incipient radiation and their influence on beam characteristics both in the near-field and far-field.

Experimentally investigated have been the possibilities of correction of thermal deformations using the variable-focus mirror, controlled by changes of hydrostatic pressure. Possibility of a full correction has been proved, which is dependent on the power, thermal effect of focusing of optical elements of the laser, and hence the possibility of dynamical optimization of the beam characteristics in the processing region.

Developed and applied in calculations has been a numerical model describing transformation of a beam of laser radiation in multi-element optical systems of radiation transmission from the laser source to the zone of interaction with a material. The model enables determination of the influence of adaptive mirror characteristics, located in the beam trajectory on the conditions of its focusing (parameter of the beam quality, dimensions and focus location) with respect to the parameters of the source beam, geometry of optical trajectory and location of mirror. The results have been presented in the reports and conference papers.

During investigations of plasma discharges for lasers determined have be-

lektywnego wzbudzenia N_2 .

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z-2/T1 wspierane były projektem badawczym KBN pn. *Układy optyki adaptacyjnej dla laserów dużej mocy* oraz projektem badawczym KBN pn. *Diagnostyka procesu spalania węglowodorów*.

O3/Z2/T2. Badania doświadczalne wymiany energii oraz emisji w matrycach stałych

Dla nowej grupy silnych emiterów w obszarze VUV widma promieniowania – ekscypleksów jonowych, uzyskiwanych przez wzbudzenie wiązką elektronów soli metali alkalicznych takich jak: CsF, CsCl i RbF, domieszkowanych w cienkich warstwach stałych Ne i Ar, oraz dla optycznie wzbudzonej molekuly CO_2 domieszkowanej w Ar, zbadano warunki tworzenia populacji centrów aktywnych i dyskutowano własności spektroskopowe. Również w warunkach wzbudzenia wiązką elektronów kryształów Ar oraz O_2/Ar , obserwowano po raz pierwszy doświadczalnie zależność wydajności desorpcji od temperatury.

Na aspektach aplikacyjnych skupiono się w badaniach cienkich warstw stopów metali nakładanych techniką laserowego napawania.

Dla przypadku cienkich warstw o strukturze martenzytycznej wzbogaco-

en the parameters of electron regions by means of the Monte Carlo method in nitrogen, as well as investigated have been theoretically a new way cw CO_2 laser excitation using the barrier discharge, applicable also in selective excitation of N_2 .

Links with other research topics

The works regarding realisation of the O3/Z-2/T1 topic were supported by a KBN research project titled Adaptive optical systems for lasers of large power and the KBN research project titled Diagnostics of hydrocarbons combustion process.

O3/Z2/T2. Experimental investigations of energy exchange and emissions in solid matrices

Investigated have been the conditions of formation of new populations of active centers, as well as discussed have been spectroscopic properties of a new group of strong emitters in the VUV region of radiation spectrum, i.e. ion exciplexes, obtained by induction of alkaline metal salts such as: CsF, CsCl and RbF, admixtured in the thin solid layers of Ne and Ar, as well as for optically induced molecule of CO_2 admixtured in Ar. Also under conditions of excitation by means of electron beam of Ar crystals and O_2/Ar , observed for the first time have been experimentally the relation between desorption efficiency and temperature.

Application aspects were the focus

nych w Nb, Ni, Mn oraz fazy dyspersyjne, wykonano testy odporności na erozję kawitacyjną. Stwierdzono, że pomimo braku mikropęknięć powodem obserwowanego pogorszenia odporności erozyjnej w przypadku niektórych próbek badanych doświadczalnie są lokalne niejednorodności materiału.

Kontynuowano badania doświadczalne napawania warstw ochronnych z przetopionego proszku stellitu SF₆ na wstępnie podgrzane podłoże. W laboratoriach CENIM w Madrycie wykonano badania metalograficzne: mikroskopowe, SEM, XEDS, mikrotwardości, składu chemicznego, odporności na korozję oraz na ścieranie. Wykazano, że efekt całkowitego wyeliminowania mikropęknięć w preparowanych laserem warstwach ochronnych uzyskuje się przy wstępnym podgrzaniu podłoża do temperatur powyżej 650°C. Stwierdzone zmniejszenie odporności ściernej oraz korozyjnej ze wzrostem temperatury wstępnego podgrzewania wskazuje na konieczność dokładnej kontroli warunków procesu i takie określenie wartości T_p , dla której pęknięcia nie będą już występowały i jednocześnie na tyle niskiej, aby jej wpływ na obniżenie własności wytrzymałościowych był jak najmniejszy.

Opracowano wyniki doświadczalne oraz obliczeniowe pól temperatur oraz naprężeń w laserowo napawanych powłokach, uzyskane we współpracy z Ośrodkiem O4. Wyniki umożliwiają określenie prawdopodobieństwa występowania pęknięć w zależności od warunków procesu napawania. Praktyczne

of attention during investigations of thin layers of metal alloys superimposed by means of laser coating technique.

In the case of thin layers with martensitic structure enriched with Nb, Ni, Mn and disperse phases performed have been the tests for the cavitation erosion resistance. It has been concluded that despite lack of microcracks of investigated samples the reason for observed impairment of erosion resistance in the case of some investigated samples were local heterogeneities of the material.

Continued have been experimental investigations of coating of protection layers from a remelted stellite powder SF₆ on a preliminarily heated base. In CENIM laboratories in Madrid conducted have been the following metallographic investigations: microscopic, SEM, XEDS, microhardness, chemical composition, corrosion resistance and grinding. It has been shown that the effect of total elimination of microcracks in the laser treated protection layers can be attained at a preliminary base heating beyond temperatures of 650°C. Concluded reduction of grinding and corrosion resistance with increase of temperature of initial heating indicates the necessity of accurate control of process conditions as well as such determination of a value of T_p , where the cracks will be not existent, but small enough to reduce to the smallest extent the strength properties.

Elaborated have been experimental and calculational results of temperature fields and stresses in laser coated shells, obtained in cooperation with the Cen-

zastosowanie rezultatu do regeneracji elementów turbin wymaga kontynuacji doświadczeń oraz obliczeń dla przypadku powłok dwu- i wielowarstwowych. Prace dotyczące laserowego napawania były wspierane grantem KBN.

W ramach paneuropejskiego programu COST kontynuowano badania doświadczalne zmierzające do rozwoju i upowszechnienia technik laserowych w renowacji i analizie obiektów zabytkowych.

Wykonano badania długoczasowych efektów oddziaływania wiązki laserowej na papier. Badania miały na celu wyjaśnienie zagadnień podnoszonych przez konserwatorów i diskutowanych w literaturze, oraz odpowiedź na pytanie, czy w wyniku naświetlania laserem powstają nieodwracalne uszkodzenia w strukturze próbek zabytków piśmiennictwa. Próbkę poddane działaniu wiązki lasera Nd:YAG (długość fali: 1064 nm, 532 nm, 355 nm i 266 nm) oraz ekscymerowego ArF (193 nm) zostały sztucznie postarzone w komorze starzeniowej. Zmiany w badanych próbkach papieru określano poprzez analizę widm uzyskanych techniką spektroskopii emisyjnej, rozproszeniowej DRIFT oraz pomiary kolorymetryczne i analizę mikroskopową.

Opublikowano w czasopismach i wydawnictwach ciągłych wyniki badań laserowego oczyszczania powierzchni zabytkowego papieru oraz obiektów z piaskowca gotlandzkiego.

Na wiodącej konferencji międzynarodowej Lacona V referowano nowe wyniki badań spektroskopowych oraz

tre O4. The results enable determination of the probability of crack appearance in relation to the conditions of the coating process. A practical application of the result in regeneration of the turbine elements requires continuation of experiences as well as calculations for the case of two and multi-layer coatings. The works regarding laser coating have been supported by the KBN research grant.

In the frame of paneuropean programme COST continued have been experimental investigations aimed at the development and dissemination of laser techniques in renovation and analysis of monumental objects.

Performed have been investigations of long-term effects of interaction of a laser beam on a paper. Investigations were aimed at explanation of the issues raised by conservators and discussed in literature, as well as to deliver answer to a question whether as a result of laser irradiation there appear irreversible damages in the sample structures of monumental stationery. The samples were exposed to action of Nd:YAG laser beam (wavelength: 1064 nm, 532 nm, 355 nm and 266 nm) as well as excimer ArF (193 nm) and became artificially aged in the ageing chamber. The changes in the investigated paper samples were determined through the analysis of spectra obtained by means of disperse emission spectroscopy DRIFT as well as colorimetric measurement and microscopic analysis.

The results of investigations of laser purification of surfaces of monumental

wyniki analizy powierzchni, uzyskane w wyniku współpracy z partnerami w Hiszpanii (ICP/CSIC) oraz Danii (School of Conservation). Prace były wspierane dwoma grantami KBN (SPUB M, oraz grant promotorski).

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z2/T2 wykonywane były w powiązaniu z pracami prowadzonymi w ramach:

- projektu badawczego KBN Nr PB 1129/T08/98/15 *Wielowarstwowe struktury stellite dla potrzeb stereolitografii laserowej oraz regeneracji,*
- projektu badawczego KBN SPUBM/COST *Technika laserowa w ochronie dóbr kultury materialnej,*
- projektu badawczego KBN *Badanie zmian w strukturze papieru w wyniku laserowego oczyszczania dla potrzeb restauracji/konserwacji zabytków piśmiennictwa.*

O3/Z3/T1. Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów i mikroobróbki materiałów

Oba zadania tematu O3/Z-3/T1, tj. zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów i laserowej mikroobróbki materiałów łączy wspólne

papers as well as objects from the Gothland sandstone have been published in journals and continuous publishings.

New spectroscopic results of investigations have been presented at a leading international conference Laco-na V together with the results of surface analysis, obtained as a result of cooperation with partners from Spain (ICP/CSIC) and Denmark (School of Conservation). The activities were supported by two KBN research grants (SPUB M and supervisor's grant).

Links with other research topics

The works regarding realization of the topic O3/Z2/T2 have been performed in combination with the activities conducted in the frame of:

- *KBN research project Nr PB 1129/T08/98/15 Multilayer stellite structures for the needs of laser stereolithography and regeneration,*
- *KBN SPUBM/COST research project Laser technique in protection of material heritage,*
- *KBN research project Investigation of changes in paper structure due to laser purification for the needs of restoration/conservation of monumental stationery.*

O3/Z3/T1. Application of laser technique for flow visualisation and material microprocessing

Both problems from the topic O3/Z3/T1, i.e. application of laser tech-

źródło laserowe (impulsowy laser CuBr lub impulsowy laser Nd:YAG z podwójną przemianą częstotliwości), które może zostać zastosowane zarówno do wizualizacji przepływów jak i do mikroobróbki materiałów.

Zadanie pod nazwą *Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów* dotyczyło zastosowania impulsowych laserów CuBr i Nd:YAG do wizualizacji przepływów gazów oraz pomiaru pól prędkości przepływów metodą PIV (Particle Image Velocimetry). W ramach tego zadania wykonano badania rozkładu pól prędkości w przepływach, w których występuje pole elektryczne, tj.:

- w modelach elektrofiltru,
- oraz w kilku modelach reaktorów plazmowych do oczyszczania gazów odlotowych ze szkodliwych gazów.

Wyniki dotyczące pomiarów pól prędkości w modelach elektrofiltru opublikowano w 1 artykule w czasopiśmie *J. Visualization*, 6 referatach konferencyjnych (The Physics Congress 2003, Electrostatics 2003, Edinburgh (Wielka Brytania); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów; Annual Meeting of the Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japonia) oraz 6 opracowaniach IMP PAN.

Wyniki dotyczące pomiarów pól prędkości w modelach reaktorów plazmowych opublikowano w 2 referatach konferencyjnych (14th Symp. on Application of Plasma Processes, Liptovsky

technique for flow visualization and laser material microprocessing have in common a laser source (impulse CuBr laser or impulse Nd:YAG laser with double frequency conversion), which can be applied both in flow visualization and material microprocessing.

The problem titled Application of laser technique for flow visualisation regarded application of impulse CuBr and Nd:YAG lasers for gas flow visualization and measurements of velocity fields using the PIV method (Particle Image Velocimetry). In the frame of that topic investigated have been velocity field distributions in flows, where electric field is present, i.e.:

- *In models of electrofilter,*
- *In selected models of plasma reactors for purification of flue gases from harmful substances.*

The results regarding measurements of velocity fields in models of electrofilter have been published in the J. Visualization, 6 conference papers (The Physics Congress 2003, Electrostatics 2003, Edinburgh (Great Britain); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów; Annual Meeting of the Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japan) and 6 IFFM internal reports.

The results of velocity field measurements in the models of plasma reactors have been published in 2 conference papers (14th Symp. on Application of Plasma Processes, Liptovsky Mikulas

Mikulas (Słowacja); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Naęczów) oraz 3 opracowaniach IMP PAN.

Badania były częściowo finansowane przez projekt badawczy KBN PB 1756/T10/01/21 pn. *Badania pól prędkości spalin w modelach elektrofiltru metodami laserowymi celem optymalizacji procesu odpylania*, Fundację Nauki Polskiej (subsydium 8/2001) oraz Air Liquide, Francja (kontrakt).

Badania wykonane były we współpracy z następującymi ośrodkami zagranicznymi: Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japonia, McMaster University, Department of Engineering Physics, Faculty of Engineering, Hamilton, Ontario, Kanada.

Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność techniki PIV do badań przepływów w urządzeniach przepływowych w obecności pola elektrycznego (elektrofiltry i reaktory plazmowe).

Badania przepływu w modelach reaktorów plazmy nietermicznej do oczyszczania gazów odlotowych ze szkodliwych związków chemicznych potwierdziły rezultaty badań zapoczątkowanych w ubiegłych latach, z których wynika, że w procesie oczyszczania bierze udział nie tylko obszar, gdzie istnieje plazma, ale także obszary pozaplazmowe, do których wskutek elektrohydrodynamicznego przepływu wtórnego napływają z obszaru plazmowego cząsteczki chemicznie aktywne.

Zadanie pod nazwą *Zastosowanie*

(Słowacja); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Naęczów) as well as 3 IFFM internal reports.

Investigations have been partially financed from the KBN research project PB 1756/T10/01/21 titled Investigations of flue gases velocity fields in models of electrofilter using the laser techniques in view of optimization of dedusting process, *Foundation for Polish Science (subsidy 8/2001) and external contract with Air Liquide, France.*

Investigations have been conducted in cooperation with the following foreign institutions: Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, and McMaster University, Department of Engineering Physics, Ontario, Canada.

Obtained results confirmed the applicability of PIV technique for investigations of flows in fluid-flow machinery in the presence of electric field (electrofilters and plasma reactors).

Investigations of flows in models of non-thermal plasma reactors for purification of flue gases from harmful substances confirmed the results of investigations commenced in previous years, from which it stems that in the process of purification not only the region with plasma is 'working' but also regions free of plasma, where due to electrohydrodynamical secondary flows income chemically active particles from the plasma region, which apparently have been produced there.

The problem titled *Application of*

techniki laserowej do mikroobróbki materiałów dotyczyło rozwoju systemu laserowego MOPA (Master Oscillator - Power Amplifier) CuBr oraz jego zastosowania do precyzyjnej obróbki materiałów i do badania charakterystyk termicznych elementów półprzewodnikowych.

Wyniki dotyczące tego zadania zostały opublikowane w w pracy doktorskiej dr Marka Kocika, pracy magisterskiej mgr inż. Roberta Barbuchy, 2 referatach konferencyjnych (II Konf. Optoelektronika 2003, Oferta nauki dla przemysłu, Poznań; II Krajowa Konferencja Elektroniki, Kołobrzeg i 17 opracowaniach IMP PAN.

Najważniejsze rezultaty tego zadania to dalsza modyfikacja unowocześniająca system laserowy MOPA CuBr do precyzyjnej obróbki materiałów. Obecnie system laserowy MOPA CuBr składa się z dwóch rur laserowych (MO – master oscillator i PA – power amplifier) oraz układu MTS do synchronizowania impulsów wyładowczych w obu rurach. Dzięki takiej konstrukcji poszerzają się znacząco możliwości generacyjne lasera CuBr. Możliwy staje się wybór częstotliwości powtarzania i liczby impulsów generowanych przez laser. Oprócz tego system laserowy MOPA CuBr może pracować jako szybka przesłona optyczna do blokowania wiązki laserowej (szybkość zadziałania około kilku s). Dzięki temu w pełni wykorzystuje się wszystkie zalety przemieszczania wiązki laserowej po powierzchni materiału za pomocą skanera laserowego, czego dotąd nie można było uczynić

laser technique for material microprocessing regarded the development of a MOPA CuBr laser system (Master Oscillator – Power Amplifier) and its application in precision material processing as well as investigations of thermal characteristics of semiconductor elements.

The results regarding that problem have been published in the doctoral dissertation by Dr Marek Kocik, MSc dissertation by Mr Robert Barbucha, 2 conference papers (II Conference Optoelektronika 2003, Scientific offer to industry, Poznań; II National Electronics Conference, Kołobrzeg) and 17 IFFM internal reports.

Most important results of that topic refer to a further modernization and modification of a MOPA CuBr laser system for precision material processing. At present the MOPA CuBr laser system consists of two laser pipes (MO – master oscillator and PA – power amplifier) as well as MTS system for synchronisation of discharge impulses in both pipes. Thanks to such construction the generation capabilities of CuBr laser increase significantly. Selection of repeating frequency becomes possible as well as the number of impulses generated by the laser. Apart from that the MOPA CuBr laser system can operate as a fast optical shuttle for blocking the laser beam (activation speed of the order of s). Due to that fact all advantages of translation of the laser beam on the material surface by means of the laser scanner are fully utilized, which was not possible up till now due to a use of

nić z powodu używania stosunkowo wolnej przesłony mechanicznej. W chwili obecnej opracowany i wykonany przez nas system laserowy MOPA CuBr jest jednym z najbardziej zaawansowanych urządzeń tego typu w Europie.

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z3/T1 wykonywane były w powiązaniu z pracami prowadzonymi w ramach projektu badawczego KBN PB 1756/T10/01/21 pn. *Badania pól prędkości spalin w modelach elektrofiltru metodami laserowymi celem optymalizacji procesu odpylania*, projektu badawczego KBN PB 1498/T11/02/22 pn. *Zastosowanie lasera CuBr nowej generacji do badania przejściowych charakterystyk termicznych elementów półprzewodnikowych* oraz Fundację Nauki Polskiej (subsyzdium 8/2001) i projektu badawczego Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej *Teoretyczne i eksperymentalne badania pól prędkości spalin w modelach elektrofiltrów celem optymalizacji procesu odpylania*.

O3/Z3/T2. Zastosowanie techniki plazmowej do oczyszczania gazów odlotowych

Długofalowym celem badań prowadzonych w Zakładzie Zastosowań Techniki Plazmowej i Laserowej jest opracowanie nowych, efektywnych i proekologicznych plazmowych metod oczyszczania różnego rodzaju gazów odlotowych

relatively slow mechanical shuttle. At present developed and manufactured by us laser system MOPA CuBr is one of the most advanced devices of that type in Europe.

Links with other research topics

Works regarding realisation of the O3/Z3/T1 topic have been conducted in combination with the activities performed in the frame of KBN research project 1756/T10/01/21 titled Investigations of flue gases velocity fields in models of electrofilter using the laser techniques in view of optimization of dedusting process, KBN research project 1498/T11/02/22 titled Application of a new generation CuBr laser in investigations of transition characteristics of semiconductor elements and Foundation for Polish Science (subsidy 8/2001) as well as a research project of the Foundation for Polish Science Theoretical and experimental investigations of flue-gas fields in models of electrofilters in view of optimization of dedusting process.

O3/Z3/T2. Application of plasma technology for purification of flue gases

A long term objective of investigations conducted at the Division of Application of Plasma and Laser Technology is the development of new, effective and proecological plasma methods of purification of various kind of flue gases from the harmful gaseous substances.

ze szkodliwych składników gazowych.

Tematyka tegorocznych prac dotyczących zastosowania techniki plazmowej do oczyszczania gazów odlotowych obejmowała:

- eliminację tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze plazmy nietermicznej z katalizatorem (reaktor ze stałonałapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym),
- rozkład freonów i podtlenku azotu za pomocą wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia”,
- efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej,
- zastosowanie techniki spektroskopii indukowanej laserem (Laser Induced Spectroscopy) do pomiarów czasowo-przestrzennych rozkładów cząstek aktywnych w plazmie nietermicznej stosowanej do dekompozycji tlenków azotu,
- badania właściwości różnych módów wyładowania koronowego.

Badania eliminacji tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze ze stałonałapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym i katalizatorem zaowocowały zwiększeniem stopnia eliminacji tlenków azotu NO i NO₂ do 96% przy zużyciu energii mniejszym niż w „czystym” wyładowaniu koronowym. Szczegółowe wyniki zostały opublikowane w 1 artykule w *Acta Agrophysica* i 6 referatach konferencyjnych (225th ACS National Meeting, New Orleans (USA); Int. Conf. on Physics of

The scope of topics realised in the present year, regarding application of plasma technology for purification of flue gases encompassed:

- *Elimination of nitrogen oxides from flue gas simulators in the non-thermal plasma reactors with a catalyst (a reactor with a positive constant voltage corona discharge),*
- *Distribution of freons and nitrogen monoxide by means of microwave discharge of the ‘torch’ type,*
- *Electrohydrodynamical effect in non-thermal plasma reactors,*
- *Application of Laser Induced Spectroscopy in time and space measurements of distributions of active particles in non-thermal plasma used in decomposition of nitrogen oxides,*
- *Investigations of properties of various modes of corona discharge.*

*Investigations of elimination of nitrogen oxides from the flue gas simulators in a reactor with a positive constant voltage corona discharge and a catalyst borne fruits in the form of increased rate of elimination of nitrogen oxides NO and NO₂ up to 96% and at the same time lower energy consumption than in a ‘pure’ corona discharge. Specific results have been published in one journal paper in *Acta Agrophysica* and 6 conference papers (225th ACS National Meeting, New Orleans (USA); Int. Conf. on Physics of Low Temperature Plasma, Kiev (Ukraine); 16th Int.*

Low Temperature Plasma, Kyiv (Ukraina); 16th Int. Symp. on Plasma Chemistry, Taormina (Włochy); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów; 4th Int. Symp. on Applied Plasma Science, Kyoto (Japonia); Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, ICPIG XXVI, Greifswald (Niemcy).

Badania rozkładu freonów i podtlenku azotu za pomocą wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” były wykonywane wspólnie z zespołem badawczym Zakładu Elektrodynamiki Gazów Zjonizowanych O3/Z-1. Głównym ich wynikiem jest opracowanie wysokoefektywnej metody dekompozycji freonów i podtlenku azotu za pomocą plazmy mikrofalowej pod ciśnieniem atmosferycznym. Innym ważnym rezultatem jest opracowanie spektroskopowej metody pomiaru temperatury gazu roboczego w plazmie mikrofalowej. Badania wykonano we współpracy z Oita University, Japonia, i McMaster University, Kanada. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w 1 artykule w *J. High Temperature Material Processes*, 1 artykule w *Acta Agrophysica* i 3 referatach konferencyjnych (8th Int. Conf. on Advanced Oxidation Technologies for Water and Air Remediation, Toronto, Ontario (Kanada); 4th Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Białoruś); Vth Int. Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, Abstracts, Greifswald (Niemcy)).

W ramach kontraktu z Air Liquide,

Symp. on Plasma Chemistry, Taormina (Italy); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów; 4th Int. Symp. on Applied Plasma Science, Kyoto (Japan); Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, ICPIG XXVI, Greifswald (Germany)).

*Investigations of freons and nitrogen monoxide distributions by means of microwave discharge of the 'torch' type have been carried out together with a research group from the Division of Gas Electrohydrodynamics O3/Z-1. Their principal outcome was a development of a highly effective method of freon and nitrogen monoxide decomposition by means of microwave plasma under atmospheric pressure. Another important result was a development of a spectroscopic method of working gas temperature measurement in microwave plasma. Investigations have been performed in cooperation with Oita University and McMaster University. Obtained results have been published in 1 journal paper in *J. High Temperature Material Processes*, 1 paper in *Acta Agrophysica* and 3 conference papers (8th Int. Conf. on Advanced Oxidation Technologies for Water and Air Remediation, Toronto, Ontario (Canada); 4th Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Belarus); Vth Int. Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, Abstracts, Greifswald (Germany)).*

In the frame of a contract with Air Liquide, France collected have been li-

Francja, zebrano dane literaturowe dotyczące reakcji chemicznych zachodzących w gazach przemysłowych zawierających związku fluoru pod wpływem plazmy wyładowań elektrycznych.

Badania efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej dotyczyły spektrofotometrycznych pomiarów stężeń NO i O₃, symulacji komputerowej stężeń O₃ oraz pomiarów transportu NH₄NO₃ metodą PIV. Zarówno O₃ jak i NH₄NO₃ są produkowane podczas procesu eliminacji tlenków azotu NO_x za pomocą wyładowania koronowego i transportowane pod prąd głównego przepływu gazu przez przepływ wtórny wywołany wyładowaniem. Uzyskane wyniki badań potwierdziły wpływ efektu elektrohydrodynamicznego na efektywność oczyszczania gazów odlotowych w reaktorach plazmy nietermicznej. Badania wykonano we współpracy z Oita University i McMaster University. Uzyskane rezultaty opublikowano w 7 referatach konferencyjnych (8th Int. Conf. on Advanced Oxidation Technologies for Water and Air Remediation, Toronto, Ontario (Kanada); 14th Symp. on Application of Plasma Processes, Liptovsky Mikulas (Słowacja); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Naęczów; 4th Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Białoruś); 30th Int. Conf. on Plasma Science, Jeju (Korea); Annual Meeting of the Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japonia) i 1 opracowaniu IMP PAN.

terature data regarding the chemical reactions taking place in industrial gases containing fluorine compounds under influence of plasma from electrical discharges.

Investigations of electrohydrodynamical effect in non-thermal plasma reactors regarded spectrophotometric measurements of NO and O₃ concentrations, computer simulations of O₃ concentrations as well as measurements of NH₄NO₃ transport using the PIV method. Both O₃ and NH₄NO₃ are produced during the elimination process of nitrogen oxides NO_x by means of corona discharge and transported upstream of a principal gas flow through the secondary flow induced by discharge. Obtained results of investigations confirmed the influence of electrohydrodynamical effect on the effectiveness of purification of flue gases in non-thermal plasma reactors. Investigations have been carried out in cooperation with Oita University and McMaster University. Obtained results have been published in 7 conference papers (8th Int. Conf. on Advanced Oxidation Technologies for Water and Air Remediation, Toronto, Ontario (Canada); 14th Symp. on Application of Plasma Processes, Liptovsky Mikulas (Slovakia); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Naęczów; 4th Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Belarus); 30th Int. Conf. on Plasma Science, Jeju (Korea); Annual Meeting of the Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japan)) and 1 IFFM

W ramach współpracy z Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japonia, kontynuowane były prace nad zastosowaniem techniki spektroskopii indukowanej laserem (Laser Induced Spectroscopy) do pomiarów czasowo-przestrzennych cząstek aktywnych w plazmie nierównowagowej stosowanej do dekompozycji tlenków azotu. Technika spektroskopii indukowanej laserem jest nowoczesną metodą badawczą, m.in. plazmy nietermicznej, efektywnie wspomagającą eksperymentalne i numeryczne badania dekompozycji gazów szkodliwych za pomocą katalizy plazmowej. W roku 2003 głównym rezultatem badań dotyczących zastosowania techniki spektroskopowej indukowanej laserem do dekompozycji tlenków azotu był przestrzenny pomiar stopnia dekompozycji NO w reaktorze typu „corona radical shower”. Uzyskane wyniki opublikowano w 1 artykule w *IEEE Trans. Ind. Appl.*, w 1 artykule w *Acta Agrophysica* i 3 referatach konferencyjnych (ESA-IEEE Joint Meeting on Electrostatics 2003, Little Rock, Arkansas (USA); 30th Int. Conf. on Plasma Science, Jeju (Korea); Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, Saga (Japonia)).

Badania właściwości różnych modów wyładowania koronowego były również wykonywane we współpracy z Oita University. Badano charakterystyki elektryczne dwóch podstawowych modów wyładowania koronowego, jarzeniowego i strimerowego, które są najważniejsze z punktu widzenia wykorzy-

internal report.

*In the frame of cooperation with Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, continued have been works on application of Laser Induced Spectroscopy in time and space measurements of active particles in non-equilibrium plasma used in decomposition of nitrogen oxides. Laser Induced Spectroscopy is a modern research tools of for example non-thermal plasma, which effectively aids experimental and numerical investigations of harmful gases decomposition by means of plasma catalysis. In 2003 a principal result of investigations regarding application of Laser Induced Spectroscopy in decomposition of nitrogen oxides was a spatial measurement of the rate of NO decomposition in the reactor of the ‘corona radical shower’ type. Obtained results have been published in 1 journal paper in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1 paper in *Acta Agrophysica* and 3 conference papers (ESA-IEEE Joint Meeting on Electrostatics 2003, Little Rock, Arkansas (USA); 30th Int. Conf. on Plasma Science, Jeju (South Korea); Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, Saga (Japan)).*

Investigations of properties of various modes of corona discharge have also been carried out in cooperation with Oita University, and McMaster University. Investigated have been electrical characteristics of two basic modes of corona discharge, namely glow and streamer discharges, which are most important from the point of view of utiliza-

stania wyładowania koronowego do dekompozycji szkodliwych gazów. Pomierzone przestrzenne rozkłady obu modów wyładowania koronowego zostaną wykorzystane do optymalizacji reaktorów plazmowych. Wyniki opublikowano w *J. Advanced Oxidation Technologies* i w 3 referatach konferencyjnych (4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów; Annual Meeting of The Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japonia); Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, Saga (Japonia)).

W ramach współpracy z McMaster University uczestniczono w analizie danych dotyczących zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez szczególnie silne atmosferyczne wyładowania elektryczne. Uzyskane wyniki opublikowane w 1 referacie konferencyjnym (XIII Int. Conf. on Electromagnetic Disturbances EMD 2003, Białystok).

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z3/T2 wykonywane były w powiązaniu z pracami prowadzonymi w ramach tematu statutowego IMP, kierowanego przez prof. Z. Zakrzewskiego: O3/Z1/T1 *Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym*, oraz w ramach kontraktu z Air Liquide, Francja.

tion of corona discharge in decomposition of harmful gases. Measured spatial distributions of both modes of corona discharge will be used in optimization of plasma reactors. The results have been published in 1 journal paper in J. Advanced Oxidation Technologies and 3 conference papers (4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO'2003, Nałęczów ; Annual Meeting of The Institute of Electrostatics Japan, Noda (Japan); Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, Saga (Japan)).

In the frame of cooperation with McMaster University, Department of Engineering Physics, Faculty of Engineering, the representative from the group participated in the analysis of data regarding electromagnetic interferences generated by uniquely strong atmospheric discharges. Obtained results have been presented in 1 conference paper (XIII Int. Conf. on Electromagnetic Disturbances EMD 2003, Białystok).

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z3/T2 have been carried out in combination with the actions conducted in the frame of statute activities of the group led by Professor A. Zakrzewski: O3/Z1/T1 Generation and modelling of plasma in microwave discharge, as well as in the frame of a contract with Air Liquide, France.

Jerzy Mizeraczyk

Translated by Dariusz Mikielewicz