

O3

Zagadnienia techniki plazmowej i laserowej

Problems of plasma and laser engineering

W 2005 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. Część badań realizowana była w ramach współpracy międzynarodowej.

W trzech Zakładach (Z1-Z3) realizowano następujące tematy statutowe: Z-1/T1 Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym, (Kierownik: prof. Z. Zakrzewski), Z-2/T1 Charakterystyki aplikacyjne intensywnych wiązek laserów technologicznych, (Kierownik: prof. G. Śliwiński), Z-2/T2 Badania doświadczalne wymiany energii oraz emisji w matrycach stałych, (Kierownik: prof. G. Śliwiński), Z-3/T1 Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów i mikroobróbki materiałów, (Kierownik: prof. J. Mizeraczyk), Z-3/T2 Zastosowanie techniki plazmowej do oczyszczania gazów odlotowych, (Kierownik: prof. J. Mizeraczyk).

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

Celem prac, prowadzonych od lat w ramach tego tematu, są badania i doskonalenie mikrofalowych generatorów plazmy. Wszystkie prace prowadzone w

In 2005, in the frame of statute activity realised have been 5 research topics encompassing production, investigation of properties and practical application of ionised media and laser radiation for technical and ecological purposes. Apart from statute activity realised have been other research activities regarding same topics and financed by KBN. Part of investigations has been realised in the frame of international cooperation.

In three Departments (Z1-Z3) realised have been following statute topics: Z-1/T1 Generation and modelling of plasma in microwave discharge, (Coordinator: Professor Z. Zakrzewski), Z-2/T1 Application characteristics of technological intense laser beams, (Coordinator: Professor G. Śliwiński), Z-2/T2 Experimental investigations of energy exchange and emissions in solid matrices, (Coordinator: Professor G. Śliwiński), Z-3/T1 Applications of laser technology, (Coordinator: Professor J. Mizeraczyk), Z-3/T2 Application of plasma technology for purification of flue gases, (Coordinator: Professor J. Mizeraczyk).

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

The objective of works, continued for several years in the frame of that topic, are investigations and modification of microwave plasma generators. All works conducted in 2005 regarded di-

2005 roku dotyczyły wyładowań i generatorów plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym.

W okresie sprawozdawczym kontynuowano gruntowną rozbudowę i modernizację bazy eksperymentalnej Zakładu. Było to możliwe, między innymi, dzięki finansowaniu i bezpośrednim dostawom sprzętu przez koncern Air Liquide (Francja). W rezultacie dysponujemy kilkoma niezależnymi stanowiskami badania i użytkowania mikrofalowych generatorów plazmy pracującymi na, zalecanych dla zastosowania w przemyśle, częstotliwościach mikrofal 2.45 GHz i 915 MHz, wyposażonymi w układy zasilania, kontroli i pomiaru wydatku mocy mikrofal, gazów roboczych i czynnika chłodzącego. Jeżeli chodzi o stanowisko 915 MHz, wynajęte w firmie Muegge z Niemiec, w ostatnich dniach bieżącego roku zostało zwrócone po wykonaniu oczekiwanych zadań.

W 2004 r wprowadziliśmy w naszym laboratorium nowe techniki diagnostyczne oraz uruchomiliśmy i zaczęliśmy stosować odpowiednie wyposażenie eksperymentalne. Prace były kontynuowane w 2005 r. Są to: 1. spektroskopowa metoda pomiaru koncentracji elektronów i temperatury gazu (z perspektywą pomiaru temperatury elektronów); 2. metoda badania przestrzennego i czasowego długich wyładowań impulsowych, podtrzymywanych falami elektromagnetycznymi.

Główny wysiłek badawczy Zakładu włożono w wykonanie prac związanych z opracowaniem i optymalizacją mikrofalowych źródeł plazmy. Ta prowadzona

scharges and plasma generators under atmospheric pressure.

In the reporting year continued has been a fundamental extension and modernisation of experimental facilities at the Department. That was possible thanks to, amongst the others, financing and direct supplies of equipment from the Air Liquide concern (France). In effect we have at our disposal several independent research rigs for investigations and usage of microwave plasma generators operating at, industrially recommended, microwave frequencies of 2.45 GHz and 915 MHz, equipped with supply systems, control and measurement of microwave output power, working gases and cooling fluid. As far as the rig featuring the frequency of 915 MHz, rented from the Muegge company from Germany, in the last days of the past year it was returned to the owner following the completion of expected works.

In 2004 we have introduced in our laboratory new diagnostic techniques as well as have commissioned and started to operate adequate experimental equipment. The works were continued in 2005. These are: 1. spectroscopic method of electron concentration measurement and gas temperature (with a perspective of electron temperature measurement); 2. method of spatial and time investigation of development of long impulse discharges sustained by electromagnetic waves.

The principal research effort of the Department has been put into carrying out works related to development and

od kilku lat tematyka, obecnie realizowana jest w ramach działalności statutowej i kontraktu z Air Liquide (AL). Prace dotyczą generacji plazmy w mieszaninach gazowych pod ciśnieniem atmosferycznym. Celem jest optymalizacja istniejących i opracowanie nowych, doskonalszych mikrofalowych generatorów plazmy stosowanych w przemysłowych technologiach oczyszczania gazów szlachetnych oraz przemysłowych reaktorach do destrukcji szkodliwych odpadów gazowych. zakres tych długofalowych prac obejmuje:

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

W wyniku powyższych prac powstają nowatorskie konstrukcje generatorów plazmy o wymaganych parametrach elektrodynamicznych, przekazywane kontrahentowi, który po opracowaniu wersji przemysłowych wdraża je w praktyce. W roku 2005 kontynuowaliśmy prace nad dwoma typami generatorów o konstrukcji falowodowej (RW TIAGO i RW surfaguide).

optimisation of microwave plasma sources. This, carried out for several years scope of topics, is presently realised in the frame of statute activity and a contract with Air Liquide (AL). The works regard plasma generation in gaseous mixtures under atmospheric pressure. Their objective is optimisation of existing and development of new, more refined microwave plasma generators used in industrial technologies of purification of noble gases as well as industrial reactors for destruction of harmful waste gases. The scope of long-term activities encompasses the following topics:

- *Diagnostics and physical modelling of produced plasma,*
- *Electrodynamical investigations of generators' characteristics,*
- *Analysis of effectiveness of power transfer of microwaves to plasma and stability of generator operation,*
- *Analysis of influence of discharge conditions and geometrical factors on action time of staying in the discharge of gaseous mixture components and the distribution of chemical processes.*

As a result of the mentioned above works there are developed novel plasma generator designs with required electro-dynamical parameters, which are conveyed to the contractor, who, after developing of prototype, implements them in practice. In 2005 continued have been works on two types of generators

Prowadzono badania źródeł plazmy typu RW surfaguide mające na celu: optymalizację charakterystyk elektrodynamicznych. W roku 2005 kontynuowaliśmy prace w zakresie mikrofalowych układów do wyładowań podtrzymywanych falą powierzchniową. Wszystkie prace dotyczyły falowodowych generatorów plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym dla częstotliwości mikrofal 2.45 GHz.

Zgodnie z nowymi oczekiwaniami kontrahenta zaprojektowaliśmy i zbudowaliśmy falowodowy układ typu surfaguide. Generator zapewnia efektywny transfer mocy mikrofal do obszaru wyładowań w szerokim zakresie przepływu gazu i dla mocy rzędu kilka kW. Wyniki prac zostały zamieszczone w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN [F-15] o charakterze poufnym. W temacie tym prowadzone są dalsze prace, których celem jest dalsza optymalizacja wraz z wprowadzeniem nowych rozwiązań technicznych.

W 2005 roku uruchomiono prace nad doskonaleniem generatorów na 915 MHz/20 kW dla przemysłu (koncern Air Liquide, Francja). W związku z tym, wszystkie istotne informacje prezentowane były w poufnym raporcie IMP PAN i będą mogły być opublikowane w przyszłości. Prowadzono badania nad doskonaleniem generatora o konstrukcji falowodowej (RW TIA-GO 915 MHz/20 kW) oraz generatorów o konstrukcji typu „kanapka” (sandwich TIAGO i sandwich surfaguide 915 MHz/20 kW). Prace dotyczące generatora wyładowania mikrofalowego o

with waveguide-based design (RW TIA-GO and RW surfaguide).

Conducted have been investigations into plasma sources of RW surfaguide type aimed at optimisation of their electrodynamic characteristics. In 2005 continued have been activities in the area of microwave systems for discharges sustained by a surface wave. All works regarded waveguide plasma generators under atmospheric pressure in the case of microwave frequency of 2.45 GHz.

In accordance to contractors new expectations we have designed and manufactured a waveguide system of surfaguide type. The generator secures effective transfer of microwave power to the regions of discharges in a wide range of gas flowrate and powers of the order of several kW. The results of works have been presented in the IMP PAN internal report [F-15] of confidential character. In that topic continued are further activities aimed at further optimization and introduction of new technical designs.

In 2005 commissioned have been works on modifications of generators for 915 MHz/20 kW for the industrial purposes (concern Air Liquide, France). In relation to that, all important information were presented in the form confidential IMP PAN reports and will only be possible to be published in future. Conducted have been works on modification of waveguide based design of generator (RW TIAGO 915 MHz/20kW) as well as “sandwich” type based designs of generators (sandwich TIAGO

konstrukcji falowodowej opisane zostały w [F-31, F-66]. Prace dotyczące generatorów wyładowania mikrofalowego typu „kanapka” opisane zostały w [F-25, F-33, E2-45, F-67].

Eksperymentalne prace w zakresie badania fizycznych mechanizmów wyładowań skoncentrowane były na badaniach wyładowania impulsowego. Badano rozwój w czasie i przestrzeni wyładowań podtrzymywanych przez fale powierzchniowe wzbudzone aplikatorem pola typu surfaguide. Parametry impulsów mocy mikrofal były następujące: częstotliwość pracy 2.45 GHz, czas trwania impulsów w zakresie μs i ms , moc szczytowa do 6 kW.

Rozpoczęliśmy eksperymentalne badanie wyładowania w neonie podtrzymywanego falą powierzchniową. Nacisk położyliśmy na prace w trybie impulsowym. Główną zaletą takiego trybu pracy w stosunku do pracy ciągłej jest ograniczenie ilości wydzielanego w wyładowaniu ciepła. Jeżeli chodzi o zalety poznawcze, to praca impulsowa daje możliwość obserwacji przebiegu wyładowania w czasie.

Prace podzielone zostały na trzy etapy:

- wyładowanie w warunkach pracy ciągłej,
- pomiary spektroskopowe,
- praca impulsowa małej i dużej mocy.

W pierwszej części pracy [F-12] mierzyliśmy długości kolumn plazmy w funkcji mocy absorbowanej. Moc mikrofal do-

and sandwich surfaguide 915 MHz/20kW). The works related to generator of microwave discharge of waveguide design have been presented in [F-31, F-66]. The works related to “sandwich” type generators of microwave discharge have been presented in [F-25, F-33, E2-45, F-67].

Experimental works in the area of physical investigations into mechanisms of discharges were concentrated on investigations of impulse discharges. Investigated has been the development in time and space of discharges sustained by surface waves induced by the field applicator of surfaguide type. The parameters of impulses of microwave were following: frequency of operation 2.45 GHz, time of impulse persistence in the range of μs and ms , peak power up to 6 kW.

We have started experimental investigations of discharge in neon sustained by a surface wave. The pressure was exerted on operation in impulse mode. The main advantage of such type of operation in comparison to continuous operation is restriction of the amount of released heat. As far as fundamental issues are concerned the impulse operation enables possibility of observation of discharge in time.

Activities have been divided into three stages:

- discharge under continuous operation,
- spectroscopic measurements,
- impulse operation of small and large power.

prowadzaliśmy do układu w formie ciągłej. Badaliśmy wpływ średnicy rurki do wyładowań oraz wpływ przepływu gazu. W celu porównania pomiary wykonaliśmy również dla argonu.

Następnie wykonaliśmy spektroskopowy pomiar gęstości elektronów dla ciągłego wyładowania w neonie zachodzącego w rurce o małej średnicy wewnętrznej (1 mm) [F-13]. Koncentrację elektronów wyznaczyliśmy w oparciu o dwie teorie: Gig-Card theory i GKS theory. Jako rezultat otrzymaliśmy rozkład gęstości elektronów wzdłuż kolumny plazmy oraz zależność od mocy na wybranej wysokości. Wyniki pomiarów są zgodne z tymi prezentowanymi w literaturze.

W trzeciej części wykonaliśmy pomiary w impulsowym trybie pracy. Moc mikrofal dostarczaliśmy w postaci serii impulsów prostokątnych. W pierwszym etapie badaliśmy wyładowania przy małym poziomie mocy mikrofal tj. do 1000 W [F-16]. Rejestrowaliśmy rozwój w czasie i przestrzeni wyładowań podtrzymywanych falą powierzchniową. W oparciu o pomiar długości kolumny plazmy i rejestracji całkowitej emisji promieniowania w czasie wyznaczyliśmy prędkość frontu jonizacji. Wyniki tej pracy wraz z pomiarami spektroskopowymi i obliczeniami numerycznymi były prezentowane na międzynarodowej konferencji „PLASMA 2005” poświęconej pracom badawczym i zastosowaniu plazmy. W drugiej części [F-17] skupiliśmy się na pomiarach dla większych mocy (około 3000 W). Badania w warunkach pracy impulsowej

In the first part of work [F-12] we have measured the lengths of plasma columns in function of absorber power. Microwave power has been supplied to the system in the continuous manner. We have investigated the tube diameter influence in discharges as well as influence of gas flow. For the sake of comparisons measurements were made also for the case of argon.

Next we have performed a spectroscopic measurement of electron density for a continuous discharge in neon, which took place in a tube with a small internal diameter (1 mm) [F-13]. Electron concentration has been determined based on two theories namely Gig-Card theory and GKS theory. As a result distribution of electron density has been obtained along the plasma column as well as relation on power at a selected height. The results of measurements are consistent with those found in literature.

In the third part of work carried out were measurements during the impulse mode of operation. The power of microwaves have been supplied in the form of a series of square impulses. In the first stage we have investigated discharges at small level of microwave power, i.e. up to 1000 W [F-16]. Recorded had been the development in time and space of discharges sustained by means of surface wave. Based on the development of plasma column length and recording of a total radiation emission in time determined has been the speed of ionization front. The results of these works together with spectroscopic measurements

dużej mocy były możliwe dzięki aparaturze pozyskanej z Niemiec w 2004 roku. Wykonaliśmy standardowe pomiary długości kolumn plazmy w funkcji parametrów stosowanych impulsów mocy padającej. Obserwowaliśmy proces filamentacji neonowej kolumn plazmy w funkcji częstotliwości stosowanych impulsów mocy mikrofal.

W okresie sprawozdawczym kontynuowano spektroskopowe badania koncentracji elektronów w plazmie. Metoda opiera się na wyznaczeniu poszerzenia Starka linii atomowej $H\beta$, emitowanej przez plazmę, bowiem zależy ono ściśle od koncentracji elektronów w badanej plazmie.

Metoda wykorzystana została do pomiaru koncentracji elektronów w wyładowaniu mikrofalowym typu „torch” oraz wyładowaniu podtrzymywanym falą powierzchniową. Wyładowania generowane były w argonie lub neonie pod ciśnieniem atmosferycznym. Uzyskane wyniki prezentowane były na konferencjach międzynarodowych [E2-22, E2-23, E2-24]. Metoda i uzyskane wyniki opisane zostały w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN [F-13]. Ponadto wybrane wyniki zaprezentowano w artykule, który został zgłoszony w renomowanym czasopiśmie.

Część prac wykonywanych w ramach tego tematu dotyczyła zastosowań w wyładowaniach mikrofalowych w ochronie środowiska. Prace te, koordynowane przez zespół Prof. Mizeraczyka, prowadzone były w przeważającej części jako zadania tematu O3/Z3/T2 i zostały szczegółowo omówione w odpo-

and numerical calculations have been presented at international conference “PLASMA 2005” devoted to research activities and plasma application [E2-9]. In the second part [F-17] we have focused on the measurements for greater power (about 3000 W). Investigations under conditions of impulse work of large power were possible thanks to the equipment acquired from Germany in 2004. We have performed standard measurements of plasma column lengths in function of parameters of applied impulses of impinging power. We have observed a process of neon filamentation of plasma columns in function of frequency of applied power impulses of microwaves.

In the reporting period continued have been spectroscopic investigations into electron concentration in plasma. The method is based on determination of Stark extension of the atomic line $H\beta$, emitted by plasma as that directly is related to electron concentration in investigated plasma.

The method has been used for measurement of electron concentration in microwave discharge of the “torch” type as well as in the discharge sustained by the surface wave. Discharges were generated in argon or neon under atmospheric pressure. Obtained results presented were at international conferences [E2-22, E2-23, E2-24]. A method and obtained results were collected in the IFFM PAS internal report [F-13]. Additionally, selected results were presented in the paper which has been submitted to a prestigious journal.

wiedniej części sprawozdania. W okresie sprawozdawczym nasz udział w realizacji tej tematyki był następujący:

- Opublikowano wyniki dotyczące zastosowania ciągłego wyładowania mikrofalowego typu „torch” do obróbki chemicznej wybranych substancji gazowych. Wyniki ukazały się w renomowanym czasopiśmie [D1-6] oraz w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN [F-46].
- Uruchomione zostały badania produkcji syngazu przy rozkładaniu metanu w plazmie wyładowania mikrofalowego typu „torch”. Wyniki prezentowane były na konferencji międzynarodowej [E2-17] oraz opisane zostały w opracowaniu wewnętrznym IMP PAN [F-30].

W 2005 roku kontynuowano prace nad doskonaleniem modelu wyładowania mikrofalowego podtrzymywanego falą powierzchniową. Prace dotyczyły wyładowania w gazach szlachetnych: argonie i neonie pod ciśnieniem atmosferycznym.

Opracowany w latach poprzednich model wyładowania w argonie został zmieniony w części poświęconej wyznaczaniu koncentracji składników plazmy. Zamiast równania Sahy zastosowano równanie ciągłości ze współczynnikami jonizacji i rekombinacji wyznaczonymi w ramach modelu zderzeniowo-radiacyjnego. Przeanalizowano podział mocy mikrofalowej wewnątrz wyładowania. Wynikiem obliczeń było wyzna-

Part of works carried out in the frame of that topic were related to applications in microwave discharges in environmental protection. These works, coordinated by the group led by Prof. Mizeraczyk, are carried out in the abundant part of the topic O3/Z3/T2 and have been discussed in detail in the relevant part of that report. In the reporting period our contribution to that scope of problems is following:

- *published have been the results related to application of continuous microwave discharge of the “torch” type for chemical processing of selected gaseous substances. The results have appeared in the prestigious journal [D1-6] as well as IMP PAN internal report [F-46].*
- *commissioned have been investigations for production of syngas during decomposition of methane in plasma of microwave discharge of “torch” type. The results were presented at international conference [E2-17] as well as presented In IMP PAN internal report [F-30].*

In 2005 continued have been works on improvement of a model of microwave discharge sustained by surface wave. The works were related to discharges in noble gases, namely argon and neon under atmospheric pressure.

Developed in recent years model of discharges in argon has been modified in the part dedicated to determination

czenie długości kolumny plazmy od dostarczonej mocy dla zadanych warunków wyładowania. Rezultaty porównano z wynikami doświadczeń przeprowadzonych w IMP PAN. Zgodność okazała się bardzo dobra. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie z listy filadelfijskiej [E1-17].

Dalszy rozwój modelu polegał na odejściu od założenia, że wyładowanie zachodzi w cienkich rurkach (kapilarach). Wymagało to uwzględnienia równań opisujących radialne rozkłady pola elektromagnetycznego fali podtrzymującej wyładowanie. Obliczenia przeprowadzono dla neonu dla kilku różnych rurek do wyładowania. Wyznaczono charakterystyki tłumienia i propagacji fali elektromagnetycznej rozchodzącej się wzdłuż kolumny plazmy. Ponadto otrzymano przestrzenne rozkłady temperatury gazu, temperatury elektronów, koncentracji składników plazmy, częstości zderzeń, składowych pola elektrycznego. Wyznaczono zależność długości wyładowania od dostarczonej mocy mikrofal. Zbadano wpływ promienia wewnętrznego rurki na parametry plazmy. Wyniki modelowania zostały przedstawione w opracowaniach [F-47÷F-49].

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 1179 Opracowanie nu-

of concentration of plasma components. Instead of Saha equation employed has been the continuity equation with ionization coefficients and recombination determined in the frame of impact-radiation model. Analysed was the split of microwave power inside the discharge. The result of calculations was determination of the plasma column length with respect to supplied power for given conditions of discharge. The results have been compared with the experimental data acquired at IMP PAN. The consistency proved to be very good. The results have been published in the journal from Philadelphia list [E1-17].

Further development of the model was based on resignation from the assumption that the discharge takes place in small diameter tubes (capillars). That required to consider equations describing radial distribution of electromagnetic field sustaining the discharge. Determined were characteristics of damping and electromagnetic wave propagation along plasma columns. Additionally obtained have been spatial distributions of gas temperature, electron temperatures, plasma component concentrations, frequency of collisions, electric field components. Determined has been relation of the length of discharge in relation to supplied power of microwave. Investigated has been the influence of tube internal radius in the plasma parameters. The results of modeling have been presented in reports [F-47÷F-49].

merycznego modelu plazmy wyładowania impulsowego (kier. dr J. Stańco), kontraktu z Air Liquide (Francja) Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas (kier. prof. Z. Zakrzewski) a także we współpracy z instytucjami w Kanadzie, Niemczech, Francji i Portugalii.

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

Rozwinięciem prac nad zagadnieniami optyki adaptacyjnej podjętymi w poprzednim, 2004 roku, były dwa zadania.

1. Badania warunków dynamicznej kontroli oraz formowania charakterystyk promieniowania laserowego w układzie z jedno oraz z wielokanałowym zwierciadłem adaptacyjnym

Prace dotyczyły warunków zależnej od czasu regulacji oraz korekcji zmian fazowych frontu falowego wiązki laserowej. Przeprowadzono szczegółową analizę danych eksperymentalnych dotyczących wpływu lokalnych deformacji zwierciadła adaptacyjnego w rezonatorze lasera, na charakterystyki modowe promieniowania.

Badania wykazały, że sygnał zmian fazowych w wiązce promieniowania laserowego, definiowany poprzez zmianę lokalnej wartości natężenia pola w odniesieniu do wartości referencyjnej (płaski front falowy) odtwarza kierunek zmian oraz poziom zaburzeń frontu falowego, spowodowanych kontrolowanymi

Links with other research topics

Investigations in the frame of the topic O3/Z1/T1 were carried out in collaboration with activities carried out in the frame of O3/Z3/T2 statute topics, KBN 1179 Development of numerical model of impulse discharge plasma, (led by Dr J. Stańco), external contract with Air Liquide (France) Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas (led by prof. Z. Zakrzewski) as well as cooperation with institutions in Canada, Germany, France and Portugal.

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

The scope of works in 2004 were concentrated on the issues of adaptive optics in the form of two problems:

1. *Investigations into conditions of dynamical control as well as formation of characteristics of laser radiation in the system with one and multi-channel adaptive mirror.*

The activities were related to the time dependent conditions of control and correction of phase wave front of laser beam. Completed has been a detailed analysis of experimental data related to the influence of local deformations of adaptive mirror in the laser resonator on the modal characteristics of radiation.

mi deformacjami powierzchni zwierciadła. Oznacza to, że rejestracji natężenia pola w wybranej płaszczyźnie może być wykorzystana do detekcji zmian fazowych, a sensor sygnału zmian natężenia pola w sprzężeniu z układem aktywnego korektora, jakim jest wielosegmentowe zwierciadło adaptacyjne, w efekcie umożliwi regulację oraz formowanie charakterystyk promieniowania laserowego w czasie rzeczywistym.

Kontynuowano prace mające na celu rozwinięcie oraz optymalizację algorytmu regulacji umożliwiającego efektywne sprzężenie między układem detekcji zmian fazowych a układem ich korekcji. W oparciu o eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki zwierciadła deformowalnego, wyznaczono funkcję odpowiedzi zwierciadła w postaci macierzy opisującej podstawowe mody deformacji powierzchni zwierciadlanej (mody Zernika), wynikające z aktywacji pojedynczych kanałów kontrolnych. Opracowany model numeryczny umożliwia określenie kombinacji segmentów kontrolnych oraz wartości napięć deformujących powierzchnię zwierciadła, wymaganych dla wygenerowania lub korekcji określonego zaburzenia fazowego.

2. Badania optymalizacyjne wybranych procesów technologicznych laserowej obróbki materiałów realizowanych w układzie ze zwierciadłem adaptacyjnym

Badano zależność odporności kawitacyjnej materiałów, ukształtowanej

Investigations indicated that the signal of phase changes in the laser radiation beam, defined as a change of local value of field intensity with respect to reference values (a flat wave front), reveals the direction of changes and the level of wave front disturbances caused by controlled deformations of the mirror surface. That means that recording of the field intensity in the selected plane can be used in detection of phase changes and the sensor of signal of field intensity changes in connection with a system of active corrector, such as multi-segment adaptive mirror which in effect enables regulation and formation of characteristics of radiation beam in the real time.

Continued have been works on development and optimisation of algorithm of regulation enabling effective coupling between the system of detection of phase changes with a system, of their correction. Basing on deformative mirror characteristics established in the experimental way determined have been the response functions of the mirror surface (the Zernik modes), which result from activation of single control channels. Developed numerical model enables determination of combination of control segments and values of voltage deforming the mirror surface required for generation or correction of prescribed phase disturbance.

2. *Optimisation investigations of selected technological processes of laser processing of materials realised in the systems incorporating*

wskutek obróbki ich powierzchni promieniowaniem lasera CO₂, od charakterystyk promieniowania kontrolowanych zwierciadłem adaptacyjnym w rezonatorze lasera.

Próbki materiałów poddawano działaniu wiązki lasera o różnej wartości mocy oraz o różnym składzie modowym. Analizę porównawczą własności naświetlonych próbek przeprowadzono dla:

- wiązki generowanej w układzie z adaptacyjnym zwierciadłem wypukłym (wiązka o rozkładzie bliskim TEM₀₀),
- w układzie ze zwierciadłem płaskim (wiązka typu TEM₀₁*+TEM₀₀), oraz
- w układzie ze zwierciadłem wklęsłym (wiązka wielomodowa).

W oparciu o dane z badań materiałowych próbek, wnioskowano o sposobach optymalizacji procesu. Najmniejszą odporność kawitacyjną wykazały próbki obrobione wiązką ukształtowaną w systemie ze zwierciadłem wypukłym. Ma to związek z wysoce niejednorodnym rozkładem natężenia promieniowania w polu wiązki typu TEM₀₀, generowanej w takim układzie. Próbki obrabiane wiązką ukształtowaną w systemie ze zwierciadłem płaskim i wklęsłym wykazały wyższy poziom odporności kawitacyjnej. Był on zbliżony do osiąganego dla wiązki prostokątnej, charakteryzującej się wysokim stopniem jednorodności rozkładu natężenia pola w przekroju

the adaptive mirror

Investigated has been a relation of material cavitation resistance, developed due to processing of their surface by means of CO₂ laser radiation on the radiation characteristics controlled by the adaptive mirror in the laser resonator.

Material samples were exposed to action of laser beam with a different value of power and different modal composition. Comparative analysis of properties of illuminated samples has been conducted for:

- *Beam generated in the system with adaptive convex mirror (a beam with distribution close to TEM₀₀),*
- *In the system featuring the flat mirror (beam of TEM₀₁*+TEM₀₀ type) and*
- *In the systems incorporating a concave mirror (multi-mode beam).*

Based on data from material investigations of samples conclusions were drawn about the ways of process optimization. The smallest cavitation resistance proved that samples processed with a formed beam in the system with convex mirror. That has a relation to highly non-homogeneous distribution of radiation intensity in the field of the beam of TEM₀₀ type, generated in such a system. Samples processed by a beam formed in the system with a flat and concave mirror indicated a higher level of cavitation resistance. It was close to

poprzecznym wiązki, przy zachowaniu odpowiedniego poziomu gęstości mocy.

Wyniki potwierdziły jednoznacznie przydatność zwierciadła adaptacyjnego. Umożliwia ono dynamiczne zmiany konfiguracji rezonatora lasera, poprzez dobór oraz kształtowanie charakterystyk promieniowania odpowiednio do wymogów procesu technologicznego [E1-19, E1-20, F-26, F-53, F-54, F-59, F-64]. Prace były wspierane grantem MEiN, numer 4 T11B 003 22 , który zakończono i rozliczono w 2005 r.

W części zadania T1, dotyczącej procesów mikroskopowych w plazmie wyładowań wykonano badania oddziaływań plazmy:

- z powierzchnią, dla przypadku sondy Langmuira, oraz
- przy powierzchni rury wyładowczej, w wyładowaniu jarzeniowym.

Przedyskutowano wyniki symulacji procesu w oparciu o model PIC-MC (cząsteczka w komórce + metoda numeryczna Monte Carlo) wraz z weryfikacją modelu w oparciu o wyniki doświadczenia dla plazmy argonowej. Otrzymało bardzo dobrą zgodność wyników obliczeniowych modelu z doświadczeniem [E1-1]. Dyskusję efektu wzrostu temperatury jonów oraz chłodzenia elektronów w warstwie przyściennej komory wyładowczej przedstawiono w pracy [E1-2].

Ponadto, w ramach projektu KBN *Diagnostyka procesu spalania węglowodorów* wykonano następujące zadania:

a level attained In the case of a square beam, characterised by a high level of homogeneity of field intensity distribution in the beam transverse cross-section, preserving adequate level of power density.

The results confirmed unanimously the applicability of adaptive mirror. That enables dynamical changes of configuration of laser resonator by selection and formation of radiation characteristics adequately to the requirements of technological processes [E1-19, E1-20, F-26, F-53, F-54, F-59, F-64]. Activities were supported with a grant awarded by the Ministry for Education and Science No. 4 T11B 003 22 , which has been accomplished and commissioned in 2005.

In the part of topic T1, related to microscopic processes in discharge plasma carried out were following investigations:

- *On a surface, in the case of Langmuir probe, and*
- *On the discharge surface of tube , in glow discharge.*

Discussed have been the results of process simulation based on the PIC-MC model (particle in the cell + Monte Carlo numerical method) together with model verification on the basis of experimental results for argon plasma. Obtained has been very good consistency between calculated results using the model and experiment [E1-1]. Discussion of the effect of ion temperature increase and electron cooling in the bounda-

- zbadano numerycznie metodą CFD propagację frontu spalania w zamkniętej komorze [E2-30, F-39],
- przeprowadzono pomiary spektroskopowe dla procesu spalania płomienia węglowodorowego w powietrzu [F-27].

Stosując technikę spektroskopii masowej określono skład jonów w plazmie frontu spalania. Modelowanie kinetyki jonowej w płomieniu propan/powietrze wykonano dla różnych koncentracji paliwa. Otrzymano dobrą zgodność wyników modelowania z eksperymentem. Zbadano również wpływ układu ekstrakcji na wyniki pomiarów, w tym na proces klasteryzacji i pojawienia się jonów $H_3O+(H_2O)_n$. Wyniki zebrano w pracach [E2-6, E2-46, F-10, D1-9], oraz w pracy [F-8], zawierającej dyskusję wpływu kinetyki jonów na charakterystyki sond Langmuira.

Wyniki części zadania T1, dotyczącej diagnostyki spalania węglowodorów i wspieranej grantem MeiN podsumowano w pracach [E2-5, F-7], z uwzględnieniem efektów gazodynamicznych towarzyszących procesowi spalania, kinetyki jonów, oraz oddziaływań elektrodynamicznych plazmy z powierzchnią.

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*

ry layer of discharge chamber has been presented in [E1-2].

Additionally in the frame of KBN project Diagnostics of hydrocarbons combustion process carried out were the following problems:

- *propagation of combustion front in a closed chamber by means of CFD method [E2-30, F-39],*
- *combustion process of hydrocarbon flame in air by means of spectroscopic measurements [F-27]*

Applying technique of mass spectroscopy determined has been the ion composition In combustion front plasma modelling of ion kinetics in the propane/air flame carried out was for different fuel concentration. A good consistency of results of modeling with experiment has been obtained. Investigated also was the influence of extraction system on the results of measurements including the clustering process and appearance of ions $H_3O+(H_2O)_n$. The results were collected in papers [E2-6, E2-46, F-10, D1-9], as well as in [F-8], which contains discussion of the influence of ion kinetics on the characteristics of Langmuir probes.

The results of the part of the problem T1, regarding diagnostics of hydrocarbon combustion and supported with the grant awarded by MEiN have been summarised in papers [E2-5, F-7], with account of gasdynamics effects accompanying combustion processes, ion kinetics and electrodynamic interactions of plasma and surface.

(kierownik: dr G. Rabczuk) oraz projektem badawczym KBN pn. *Diagnostyka procesu spalania węglowodorów* (kierownik: dr A. Cenian).

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

Rozwijano badania nad laserowym przetapianiem warstw ochronnych oraz dla potrzeb stereolitografii laserowej, w ramach tematu statutowego wspieranego projektem badawczym 0809/T08/02/22, oraz współpracy dwustronnej z CENIM/CSIC w Madrycie. Dyskusję wyników obliczeń numerycznych, pól temperatur oraz naprężeń w laserowo napawanych dwuwarstwowych powłokach stelliteowych, jak również wyniki badań laserowo napawanych powłok stelliteowych: mikroskopowe SEM, składu chemicznego, mikrotwardości, odporności na korozję oraz na ścieranie, zawarto w pracach [D1-2, E1-7, E1-8, E2-25].

Wykonano również w ramach współpracy polsko-bułgarskiej badania procesów ablacji ceramiki AlN przy użyciu lasera Nd:YAG [E2-40].

Wykonano przy użyciu sondy Langmuira pomiary rozkładów temperatury oraz prędkości elektronów i jonów powstających podczas ablacji ZnO, SiO, oraz SiO₂. Wyniki uzupełnione o dane uzyskane przy użyciu spektrometru TOF-MS (Madryt) przedstawiono w referacie na konferencję COLA i publikacji [E2-18, F-28].

Kontynuowano badania w zakresie

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z-2/T1 were supported with KBN research project Systems of adaptive optics for large power lasers (led by Dr G. Rabczuk) and a KBN research project Diagnostics of hydrocarbon combustion process (led by Dr A. Cenian).

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

Extended have been investigations of laser remelting protection layers and, for the needs of laser stereolithography, in the frame of research project 0809/T08/02/22, of a statute activity together with bilateral cooperation with National Centre for Metallurgical Research in Madrid. Discussion of the results of numerical investigations of temperature fields and stresses in laser coated two-layer stellite coatings, namely microscope SEM, chemical composition, corrosion and abrasion resistance, have been contained in papers [D1-2, E1-7, E1-8, E2-25].

Carried out also were investigations In the frame of Polish-Bulgarian cooperation of ablation processes of AlN ceramics using Nd:YAG laser [E2-40].

Carried out were measurements of temperature distributions and electron and ion velocities using the Langmuir probe during ZnO, SiO, and SiO₂ ablation. The results supplemented by data obtained using the spectrometer TOF-

zastosowań techniki laserowej w konserwacji obiektów zabytkowych, we współpracy z zespołami analityków z Kopenhagi (School of Conservation), Madrytu (Institute of Chemical Physics), oraz RCBS (W. Mechaniczny PG) Gdańsk.

Efekty laserowego oczyszczania z monitoringiem LIBS, oryginalnych i modelowych próbek piaskowca, zbadane przy użyciu techniki kolorymetrycznej, wykazały zażółcenie powierzchni w granicach błędu pomiarowego, niezależnie od rodzaju oraz prędkości przepływu gazu osłonowego (powietrze, azot techniczny) [D1-1, E1-4÷5, E1-10, E2-19÷20]. Analiza SEM/EDS próbek naświetlanych laserem wykazała poza pierwiastkami naturalnie występującymi w piaskowcu gotlandzkim, również obecność siarki, chloru, cynku i tytanu, pochodzących z zanieczyszczeń powierzchni [F-29].

W celu identyfikacji pigmentów polichromii na obiektach zabytkowych z okresu XIV/XV w., wykonano serię badań analitycznych przy użyciu technik spektroskopowych LIPS oraz Ramanowskiej (we współpracy z lab. w Madrycie). Wyniki przedstawiono w referatach na konferencjach „Lacona” i „Raman in Art & Archaeo” oraz w publikacji [D1-3, E2-28, E2-18, F-36÷38].

Wyniki doświadczalne dotyczące laserowego oczyszczania papieru oraz dyskusję wyników spektroskopowych LIF oraz LIBS, uzyskane dla próbek modelowych i historycznych, przedstawiono w referatach konferencyjnych oraz opracowaniu monograficznym [D1-4, D1-5, E2-27, E2-33÷34].

-MS (Madrid) have been presented in the paper presented at COLA conference and a journal paper [E2-18, F-28].

Continued have been investigations in the area of application of laser technique in conservation of monumental objects, which have been carried out in cooperation with a group of analysts from Copenhagen (School of Conservation), Madrid (Institute of Chemical Physics) and RCBS (Faculty of Mechanical Engineering, Gdańsk University of Technology) Gdańsk.

Effects of laser purification with LIBS monitoring, original and modelling samples of sandstone, investigated by means of colorimetric technique, indicated change of colour to yellow in the range of measurement error, independently from the kind and velocity of covering gas flow (air, technical nitrogen) [D1-1, E1-4÷5, E1-10, E2-19÷20]. SEM/EDS analysis of samples illuminated by laser indicated apart from atoms naturally present in the Gotland sandstone, also the presence of sulphur, chloride, zinc and titanium, coming from the surface contaminations [F-29].

With respect to identification of pigment of polychromy on monumental objects from the period of XIV/XV century, completed has been a series of analytical investigations using the LIPS and Ramanowska spectroscopic techniques (in collaboration with the laboratory in Madrid). The results have been presented at “Lacona” and “Raman in Art & Archaeo” conferences and articles [D1-3, E2-28, E2-18, F-36÷38].

Experimental results related to laser

Ponadto, skompletowano i uruchomiono dwa nowe stanowiska pomiarowe: spektrometr XRF, oraz spektrometr do pomiarów współczynnika odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR: 1000-2500 nm) [F-58]. Spektrometr NIR ma służyć bo badań stopnia degradacji materiałów organicznych, np. stanu zachowania zabytkowych papierów, oraz identyfikacji zanieczyszczeń organicznych np. grzybów na powierzchni papieru.

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* (kierownik: prof. G. Śliwiński),
- projektu badawczego KBN SPUBM/COST *Technika laserowa w ochronie dóbr kultury materialnej* (kierownik: prof. G. Śliwiński),
- projektu badawczego KBN SPUBM/COST *Spektrometr XRF dla muzeów Pomorza i nieniszczącej analizy zabytków* (kierownik: dr inż. M. Sawczak),
- promotorskiego projektu badawczego KBN mgr inż. K. Komar *Badanie zmian w strukturze*

purification of paper as well as discussion of LIF and LIBS spectroscopic results, obtained for model and historical samples presented have been in conference contributions as well as monography [D1-4, D1-5, E2-27, E2-33÷34].

Additionally, completed and commissioned were two research rigs, namely, XRF spectrometer and spectrometer for measurements of reflection coefficient In the range close to infrared radiation (NIR: 1000-2500 nm) [F-58]. NIR spectrometer has to serve for investigations of a rate of degradation of organic materials, such as for example condition of monumental papers and identification of organic contaminations in the form of fennels on the paper surface.

Links with other research topics

The works related to realisation of topic O3/Z2/T2 have been carried out in combination with activities performed in the frame:

- KBN research project No. PB 1129/T08/98/15 *Multi-layer stellite structures for laser stereolithography and regeneration (led by Prof. G. Śliwiński),*
- KBN research project SPUBM/COST *Laser technique in conservation of material culture wealth (led by Prof. G. Śliwiński),*
- Research project KBN SPUBM/COST *XRF spectrometer for Pomeranian musea*

papieru w wyniku laserowego oczyszczania dla potrzeb restauracji/konserwacji zabytków piśmiennictwa (kierownik: prof. G. Śliwiński).

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 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 wizualizacje i badania rozkładu pól prędkości w modelach elektrofiltru z uwzględnieniem trzech składowych prędkości (metoda 3D PIV). Uzyskane wyniki opublikowano w 1 artykule w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (J. Electrostatics [E1-10]), 1 artykule w czasopiśmie spoza listy filadelfijskiej (Journal of the Institute of Electrostatics jJpan [E1-13]), 4 referatach konferencyjnych (4th i 5th Int. Conf. on

and non-damaging analysis of monuments (led by Dr M. Sawczak),

- KBN PHD research project (Mr K. Komar) Investigations of changes in paper structure due to laser purification for restoration/conservation of bibliographical monuments (led by Prof. G. Śliwiński).

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

Both problems of the topic O3/Z-3/T1, i.e. application of laser technique for flow visualisation and laser material microprocessing are linked by a common laser source (an impulse CuBr laser or impulse Nd:YAG laser with a double frequency conversion), which can be applied both in flow visualisation and material microprocessing.

The problem titled Application of laser technique for flow visualisation regarded implementation of impulse lasers CuBr and Nd:YAG for visualisation of gas flow patterns and measurements of velocity fields by means of PIV method (Particle Image Velocimetry). In the frame of that topic conducted have been visualisations and investigations of velocity fields in models of electrofilters with account of three velocity components (3D PIV). Obtained results were published in 1 article in a journal from Philadelphia list (J. Electrostatics [E1-10]), 1 journal paper in a journal not from Philadelphia list (Jo-

Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, Nałęczów [E2-3, E2-8, E2-43, E2-44]) oraz 2 opracowaniach IMP PAN ([F-3] i [F-51]). Wyniki badań potwierdziły przydatność techniki 3D PIV do badań przepływów w urządzeniach przepływowych w obecności pola elektrycznego (elektrofiltry i reaktory plazmowe). Uzyskane rezultaty są przydatne do oceny skuteczności pracy elektrofiltrów, w tym do oceny usuwania submikronowych cząstek pyłu. Jest to aktualny temat badawczy dziedzinie elektrofiltrów.

Badania wykonano we współpracy z następującymi ośrodkami zagranicznymi: Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japonia, Prof. T. Ohkubo i McMaster University, Department of Engineering Physics, Faculty of Engineering, Hamilton, Ontario, Kanada, Prof. J.-S. Chang.

Zadanie pod nazwą *Zastosowanie techniki laserowej do mikroobróbki materiałów* dotyczyło bezpośredniego naświetlania laserowego za pomocą lasera Nd:YAG 355 nm w zastosowaniu do produkcji płytek drukowanych o wysokiej gęstości upakowania. Bezpośrednie naświetlanie laserowe (Laser Direct Imaging) jest nowoczesną techniką wykonywania mozaiki ścieżek na płytkach drukowanych, efektywnie konkurującą z konwencjonalnymi metodami fotochemicznymi. Niestety, istniejące na rynku urządzenia komercyjne do naświetlania płytek drukowanych w technologii LDI, ze względu na bardzo wysoką cenę, długo nie będą dostępne dla wielu małych

urnal of the Institute of Electrostatics jJpan [E1-13]), 4 conference papers (4th and 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, Nałęczów [E2-3, E2-8, E2-43, E2-44]) as well as 2 IMP PAN internal reports [F-3] and [F-51]. The results of investigations confirmed the applicability of 3D PIV technique for investigations of flows in fluid-flow machinery in the presence of electric field (electrofilters and plasma reactors). Obtained results are useful for efficiency assessment of electrofilter operation, including the assessment of removal of sub-micron dust particles. That is a contemporary research topic in the area of electrofilters.

Investigations have been carried out in the frame of cooperation with the following foreign institutions: Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, Professor T. Ohkubo and McMaster University, Department of Engineering Physics, Faculty of Engineering, Hamilton, Ontario, Canada, Professor J.-S. Chang.

The topic titled Application of laser technology for material microprocessing has been related to direct laser illumination by means of Nd:YAG 355 nm laser in application to production of printed circuits of high density of packing. Direct Laser Imaging is a modern technology of manufacturing a mosaic of paths on printed circuits, which effectively competes with conventional photochemical methods. Regrettably, existing on the market commercial systems for

i średnich przedsiębiorstw. Dlatego też celem badań prowadzonych w ramach tego zadania jest opracowanie tańszego urządzenia do LDI. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w 1 artykule w wydawnictwie ciągłym (Proceedings of SPIE [E1-11]), 3 referatach konferencyjnych (IV Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko; Int. Congress on Optics and Optoelectronics, Warszawa; 29-th Int. Conf. of IMAPS Poland Chapter, Koszalin [E2-4, E2-2, E2-1]) i 5 opracowaniach IMP PAN [F-1, F-4, F-5, F-43, F-65].

W ramach umowy z Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku wykonano pomiary trzech składowych prędkości wokół modeli kadłubów statków i śrub okrętowych metodą 3D PIV podczas manewrów w basenie holowniczym Ośrodka Hydromechaniki Okrętu CTO (2 opracowaniach IMP PAN [F-41, F-42]).

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 1381/T11/2004/27 pn. *Opracowanie metody bezpośredniego naświetlania laserowego do produkcji płytek drukowanych o wysokiej gęstości upakowania* (kierownik: prof. J. Mizeraczyk), oraz w ramach 2 umów z Centrum Techniki Okrętowej S.A. w Gdańsku: *Wykonanie pomiarów pola prędkości przepływu wokół modelu śruby pracującej za*

imaging of printed circuits in LDI technology will not be accessible for small and medium enterprises for long time due to very high investment costs. Therefore the objective of carried out research is development of a cheaper system for LDI. Obtained results have been published in one article in continuous publishing journal (Proceedings of SPIE [E1-11]), 3 conference contributions (IV National Conference on Electronics, Darłówko; Int. Congress on Optics and Optoelectronics, Warszawa; 29-th Int. Conf. of IMAPS Poland Chapter, Koszalin [E2-4, E2-2, E2-1]) as well as 5 IMP PAN internal reports [F-1, F-4, F-5, F-43, F-65].

In the frame of agreement with the Marine Technology Centre (CTO) in Gdańsk carried out were measurements of three components of velocity around the models of ships' hulls and marine propellers by means of 3D PIV during maneuvers in the pool of Marine Hydro-mechanics Centre of CTO (2 IMP PAN internal reports [F-41, F-42]).

Links with other research topics

Works regarding realisation of the topic O3/Z3/T1 were carried out in combination with activities conducted in the frame of KBN research project 1381/T11/2004/27 Development of a method of direct laser illumination for production of printed circuits with high density of packing (led by Prof. J. Mizeraczyk), as well as two contracts with the Centre for Marine Technology in Gdansk, namely Measurements of velo-

modelem kadłuba statku w basenie holowniczym Ośrodka Hydromechaniki Okrętu (kierownik: prof. J. Mizeraczyk) i Wykonanie pomiarów trzech składowych pola prędkości w wybranych płaszczyznach w przepływie wokół modeli dwóch statków, z i bez pracującej śruby okrętowej, za pomocą metody PIV (kierownik: prof. J. Mizeraczyk).

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 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 lub sitem molekularnym (reaktor ze stałonapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym),
- eliminację fenolu w wodzie za pomocą stałonapięciowego wyładowania koronowego,
- efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej,

city field around the model of propeller operating beyond the ship's hull in the towing pool of Marine Hydromechanics Centre (led by Professor J. Mizeraczyk) and Measurements of three components of velocity field in selected planes in flows around two ships with and without operating marine propeller by means of PIV method (led by Professor J. Mizeraczyk).

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

A long term objective of investigations carried out at the Department of Plasma and Laser Techniques Applications is development of new, effective and pro-ecological plasma methods of purification of different kinds of flue gases from harmful gaseous components.

The scope of activities in the current year regarded application of plasma techniques for purification of flue gases encompassed:

- *Elimination of nitrogen oxides from flue gas simulators in non-thermal plasma reactors with catalysers or molecular sieve (a reactor with a positive constant-voltage corona discharge),*
- *Elimination of phenol in water by means of a constant voltage corona discharge,*
- *Electrohydrodynamical effect in non-thermal plasma reactors,*
- *Application of Laser Induced Spectroscopy for measurements of*

- zastosowanie techniki spektroskopii indukowanej laserem (Laser Induced Spectroscopy) do pomiarów czasowo-przestrzennych rozkładów cząstek aktywnych w plazmie nietermicznej stosowanej do dekompozycji tlenków azotu,
- zastosowania plazmy wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” do reformingu metanu celem produkcji wodoru.

Badania eliminacji tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze ze stałonapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym zaowocowały wyjaśnieniem mechanizmów usuwania tlenków azotu w obecności katalizatora lub sita molekularnego. Szczegółowe wyniki zostały opublikowane w 1 artykule w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (*J. Adv. Oxid. Technol.* [E1-3]) i 4 referatach konferencyjnych (15th Symposium on Applications of Plasma Processes, Podbanske, (Słowacja); 32nd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Tarragona (Hiszpania); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-10, E2-35, E2-14, E2-16]).

W ramach współpracy z Cheju National University, Department of Chemical Engineering & Clean Technology, Jeju, Korea, wykonano badania, których celem była optymalizacja usuwania tlenków azotu w systemie hybrydowym wyładowanie barierowe-katalizator. Uzyskane rezultaty opublikowano w 2 artykułach w czasopismach

time and space distributions of active particles in non-thermal plasma used for decomposition of nitrogen oxides,

- *Application of microwave discharge plasma of the "torch" type for methane reforming in view of hydrogen production.*

*Investigations of nitrogen oxides eliminations from flue gases in a positive constant-voltage reactor corona discharge borne benefits in explanation of mechanisms of removal of nitrogen oxides in the presence of catalyser or a molecular sieve. Particular results have been published in 1 article from a journal from Philadelphia list (*J. Adv. Oxid. Technol.* [F-41, F-42]) and 4 conference papers (15th Symposium on Applications of Plasma Processes, Podbanske, (Slovakia); 32nd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Tarragona (Spain); 4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-10, E2-35, E2-14, E2-16]).*

*In the frame of cooperation with Cheju National University, Department of Chemical Engineering & Clean Technology, Jeju, Korea, carried out were investigations aimed at optimization of nitrogen oxides removal in hybrid system barrier discharge-catalyst. Obtained results were published in 2 articles in journals from Philadelphia list (*Chemical Engineering Journal, Acta Physica Slovaca* [E1-15÷16]) and 1 conference paper (15th Symposium on Applica-*

z listy filadelfijskiej (Chemical Engineering Journal, Acta Physica Slovaca [E1-15÷16]) i 1 referacie konferencyjnym (15th Symposium on Applications of Plasma Processes, Podbanske, (Słowacja) [E2-39]).

Badania eliminacji fenolu w wodzie za pomocą stałonapięciowego wyładowania koronowego obejmowały prace eksperymentalne oraz numeryczne. Badania potwierdziły, że stałonapięciowe wyładowanie koronowe do powierzchni wody, niewymagające wyrafinowanej aparatury, eliminuje fenol równie efektywnie jak wyładowanie impulsowe w wodzie, które wymaga specjalnej instalacji elektrycznej. Szczegółowe wyniki badań opublikowano w 3 referatach konferencyjnych (15th IEEE Int. Conf. on Dielectric Liquids, Coimbra (Portugalia); 2nd European Conference on Oxidation and Reduction Technologies, Göttingen (Niemcy); 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Nałęczów [E2-11, E2-12, E2-15]) i 3 opracowaniach IMP PAN [F-21÷23].

Badania efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej dotyczyły modelowania transportu O_3 w reaktorze plazmy nietermicznej oraz pomiarów transportu NH_4NO_3 w reaktorze plazmy nietermicznej metodą PIV. Wykazano, że zarówno O_3 jak i NH_4NO_3 są produkowane podczas procesu eliminacji tlenków azotu NO_x w wyładowaniu koronowym, a następnie transportowane pod prąd głównego przepływu gazu przez prze-

tions of Plasma Processes, Podbanske, (Slovakia) [E2-39]).

Investigations into phenol elimination in water by means of a constant-voltage corona discharge encompassed experimental and numerical activities. Investigations confirmed that a constant-voltage corona discharge to water surface, which does not require high tech systems, eliminates phenol equally effectively as impulse discharge in water, which on the other hand requires special electrical installation. Particular results of investigations have been published in 3 conference contributions (15th IEEE Int. Conf. on Dielectric Liquids, Coimbra (Portugal); 2nd European Conference on Oxidation and Reduction Technologies, Göttingen (Germany); 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Nałęczów [E2-11, E2-12, E2-15]) and 3 IMP PAN internal reports [F-21÷23].

Investigations into the electrohydrodynamical effect in non-thermal plasma reactors regarded modelling of O_3 transport in non-thermal plasma reactor as well as measurement of transport of NH_4NO_3 in non-thermal plasma reactor by means of PIV method. It has been shown that both O_3 and NH_4NO_3 are produced during elimination process of nitrogen oxides NO_x in corona discharge and then transported upstream the main gas flow through the secondary flow (electrohydrodynamical flow) induced by discharge. Obtained results have been published in 2 conference contributions (4th Int. Conf. on

plyw wtórny (przepływ elektrohydrodynamiczny) wywołany wyładowaniem. Uzyskane rezultaty opublikowano w 2 referatach konferencyjnych (4th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-13, E2-9]).

W ramach współpracy z Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japonia, Prof. T. Ohkubo, 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. W roku 2005 głównym rezultatem badań dotyczących zastosowania techniki spektroskopowej indukowanej laserem do dekompozycji tlenków azotu był przestrzenny pomiar stopnia produkcji rodników OH oraz dekompozycji NO w reaktorze wyładowania koronowego typu dysze-płyta. Uzyskane wyniki opublikowano w 1 artykule w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (IEEE Trans. Ind. Appl. [E1-9]) i 3 referatach konferencyjnych (6th Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics, Les Houches (Francja); 4th i 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-31, E2-37, E2-32]).

W ramach współpracy z Oita University zbadano również charakterystykę stałonapięciowego wyładowania koronowego indukowanego laserem UV. Rezultaty opublikowano w 1 artykule w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (J.

Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-13, E2-9]).

In the frame of cooperation with Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, Professor T. Ohkubo, continued have been works on application of Laser Induced Spectroscopy in time and space measurements of active particles in non-equilibrium plasma used for decomposition of nitrogen oxides. In 2005 the principal achievement of investigations related to application of Laser Induced Spectroscopy for decomposition of nitrogen oxides was a spatial measurement of the rate of OH radicals production as well as NO decomposition in the reactor. Results were published in 1 article from the Philadelphia list (IEEE Trans. Ind. Appl. [E1-9]) and 3 conference contributions (6th Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics, Les Houches (France); 4th and 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Naęczów [E2-31, E2-37, E2-32]).

In the frame of cooperation with Oita University investigated also was a constant-voltage characteristics of corona discharge induced by UV laser. Results were published in 1 article from Philadelphia list (J. Adv. Oxid. Techn. [E1-18]) and 1 article in continuous publishing (Proceedings of SPIE [E1-12]).

Investigations of methane reforming by means of impulse microwave discharge of "torch" type were carried out in cooperation with a research group from

Adv. Oxid. Techn. [E1-18]) oraz 1 artykule w wydawnictwie ciągłym (Proceedings of SPIE [E1-12]).

Badania reformingu metanu za pomocą impulsowego wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” były wykonywane wspólnie z zespołem badawczym Zakładu Elektrodynamiki Gazów Zjonizowanych O3/Z-1, kierowanym przez prof. Z. Zakrzewskiego. Głównym ich wynikiem jest opracowanie metody produkcji wodoru poprzez reforming metanu za pomocą plazmy mikrofalowej pod ciśnieniem atmosferycznym. Innym ważnym rezultatem jest optymalizacja spektroskopowej metody pomiaru temperatury gazu roboczego w plazmie mikrofalowej. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w 2 referatach konferencyjnych (6th Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics, Les Houches (Francja); 4th i 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Nałęczów [E2-22, E2-36, E2-17, E2-23÷24]) i 2 opracowaniach IMP PAN [F-20, F-46].

W ramach kontraktu z Air Liquide, Francja, wykonano wspólnie z zespołem badawczym prof. Z. Zakrzewskiego pomiary pól prędkości przepływu w reaktorze plazmy mikrofalowej (3 opracowania IMP PAN [F-21, F-18, F-24]).

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z3/T2 wykonywane były w powiązaniu z pracami prowadzonymi w

the Division of Electrodynamics of Ionised Gases O3/Z1, led by Profesor Z. Zakrzewski. The major result obtained from that cooperation is development of a method of hydrogen production through methane reforming by means of microwave plasma under atmospheric pressure. Another important result is optimization of spectroscopic method of measurement of temperature of working gas in microwave plasma. Obtained results were published in 2 conference contributions (6th Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics, Les Houches (France); 4th and 5th Int. Conf. on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, ELMECO, Nałęczów [E2-22, E2-36, E2-17, E2-23÷24]) and 2 IMP PAN internal reports [F-20, F-46].

In the frame of a contract with Air Liquide, France carried out were, in cooperation with a research group led by Profesor Z. Zakrzewski measurements of flow velocity field in microwave plasma reactor (4 IMP PAN internal reports [F-21, F-18, F-24]).

Links with other research topics

The works regarding realisation of a topic O3/Z3/T2 were carried out in combination with activities conducted in the frame of IMP PAN statute activity coordinated by Prof. Z. Zakrzewski: O3/Z1/T1 Generation and modelling of plasma in microwave discharge, KBN research project 1280/T11/2004/27 Application of electrical discharges for water purification

ramach tematu statutowego IMP, kierowanego przez prof. Z. Zakrzewskiego: O3/Z1/T1 *Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym*, projektu badawczego KBN PB 1280/T11/2004/27 pn. *Zastosowanie wyładowań elektrycznych do oczyszczania wody z zanieczyszczeń organicznych* (kierownik: dr inż. M. Dors) oraz w ramach kontraktu z Air Liquide, Francja (kierownik prof. Z. Zakrzewski).

from organic contaminations (*led by Dr M. Dors*) and in the frame of a contract with Air Liquide, France (*coordinated by Prof. Z. Zakrzewski*).

Jerzy Mizeraczyk

Translated by Dariusz Mikielwicz