

O3

Zagadnienia techniki plazmowej i laserowej

Problems of plasma and laser engineering

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 prowadzono badania w innych projektach badawczych dotyczących tej samej tematyki, finansowane przez KBN i FNP. Część badań realizowana była w ramach współpracy międzynarodowej.

Oto wykaz tematów w ramach których prowadzono badania statutowe:

O3/Z1/T1 Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym (kier. – prof. Z. Zakrzewski),

O3/Z2/T1 Charakterystyki aplikacyjne promieniowania lasera przepływowego CO₂ (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 tych długookresowych prac są badania i doskonalenie mikrofalo-

In the frame of statutory activity realised have been 5 research topics encompassing production, investigation of properties and practical applications of ionised media and laser radiations for technical and ecological purposes . Apart from statutory activity investigations were led in other research projects which regarded similar topics and were funded by KBN and FNP. A part of investigations have been realised in the frame of international co-operation.

Presented below is a list of subjects in frames of which statutory investigations were led:

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

O3/Z2/T1 Application characteristics of cw CO₂ laser radiation (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 techniques for flow visualisation and material microprocessing (led by prof. J. Mizeraczyk),

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

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

The aim of these long term studies are investigations and improvement of

wych generatorów plazmy. W 2002 r. głównie kontynuowano badania generatorów plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym. Poza tym podjęto prace nad nową rodziną mikrofalowych generatorów plazmy.

W ramach badania fizycznych mechanizmów w wyładowaniach mikrofalowych pod ciśnieniem atmosferycznym przeprowadzono spektroskopowe pomiary temperatury elektronów i temperatury gazu w plazmie wyładowania typu „pochodnia”. Stosowano przy tym nowatorską metodę wyznaczania temperatury gazu. Opis metody oraz uzyskane wyniki badań spektroskopowych przedstawiono w [E1-10; E2-15, 16].

Wykonano badania wpływu strumienia gazu na strukturę płomienia plazmowego. Stosowano przy tym metodę wizualizacji i przepływu opracowaną przez zespół pod kierunkiem prof. Mizeraczyka. Wyniki opublikowano w [E1-19; E2-7].

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.

Już w ubiegłych latach prowadziliśmy badania wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” w zastosowaniu do eliminacji ekologicznie szkodliwych składników mieszanin gazowych. Wykazaliśmy praktyczną przydatność takich zastosowań.

of microwave generators of plasma. In 2002 investigations of generators of plasma were continued mainly under atmospheric pressure. Apart from that works started on the development of a new family of microwave generators of plasma.

In the frame of investigations of physical mechanisms in microwave discharges under atmospheric pressure conducted have been spectroscopic measurements of electron temperature as well as gas temperature in the torch-type plasma discharge. A novel method of determination of the gas temperature has been used in that activity. The description of the method together with obtained results of spectroscopic investigations have been presented in [E1-10; E2-15, 16].

Conducted have been investigations of the influence of the gas stream on the structure of the plasma flame. A method for the flow visualisation, developed by the group led by Professor Mizeraczyk, has been applied in that research. The results have been published in [E1-19; E2-7].

Part of works performed in the frame of the discussed topic regarded application of microwave discharges in the environmental protection. These works, co-ordinated by Professor Mizeraczyk, conducted have been predominantly in the scope of activities within the topic O3/Z3/T2 and have been described in the relevant part of the report.

For some years now conducted have been investigations of the torch type microwave discharge in application to elimination ecologically harmful com-

W okresie sprawozdawczym stosowano takie wyładowania do dekompozycji freonów we współpracy z O3/Z3, a także perfluorinated compounds (PFC) – we współpracy z Uniwersytetem Montrealskim. Uzyskano pozytywne rezultaty. Stwierdzono, że stopień dekompozycji oraz wydajność energetyczna rozkładu tych związków są, w przypadku pochodni plazmowej, lepsze niż dla innych metod plazmowych. Uzyskane wyniki przedstawiono w [D1-3, 8; E1-8, 9, 16; E2-17÷19].

Opracowano nowatorską rodzinę mikrofalowych generatorów plazmy pod ciśnieniem normalnym lub obniżonym. W ich konstrukcji wykorzystuje się technologię linii płaskich lub faldowców. Ze względu na współpracę z Air Liquide, wyniki nie mogą być publikowane i zostały przedstawione w poufnym opracowaniu IMP [F-54].

Opracowano program numeryczny i wykonano wstępne obliczenia czasowych zmian parametrów plazmy mikrofalowego płomienia plazmowego w azocie pod ciśnieniem atmosferycznym. Wykorzystano opracowany wcześniej model globalny. W odróżnieniu od klasycznych modeli globalnych, gdzie rozważa się jedynie stan ustalony, w prezentowanym modelu bierze się pod uwagę również czasowe zmiany temperatur i gęstości cząstek. Ostatecznym celem tych prac jest zastosowanie użytych metod dla modelowania plazmy impulsowych wyładowań mikrofalowych w zanieczyszczonym powietrzu lub gazach odlotowych, [E2-54; F-50, 51].

ponents of gaseous mixtures. A practical applicability of the method has been proven.

In the reporting period such discharges have been applied in freon decomposition, in co-operation with O3/Z3, as well as in the case of perfluorinated compounds (PFC) – in co-operation with the University of Montreal. Promising results have been obtained. It has been concluded that the degree of decomposition and the energetic efficiency of decomposition of such compounds are, in the case of the plasma torch, better than in the case of other plasma methods. Obtained results have been presented in [D1-3, 8; E1-8, 9, 16; E2-17÷19].

Developed has been a novel family of microwave plasma generators under normal or reduced pressure. In their assembly a technology of flat lines or the waveguides is used. The research is done in co-operation with the industrial partner, namely Air Liquide, and therefore bear the confidentiality mark and cannot be published. The results of study have been presented in a confidential report [F-54].

Developed has been a numerical code and preliminary calculations have been done of the change of time constants in plasma microwave parameters of the plasma flame in nitrogen under atmospheric pressure. Developed earlier global model has been used in these calculations. Contrast to classical global models, where considered is only the steady state, in the presented model considered are also temperature chan-

Obliczono przestrzenne rozkłady parametrów plazmy wyładowania w azocie podtrzymywanego falą powierzchniową o częstotliwości mikrofal równej 2.45 GHz i porównano z odpowiednimi rozkładami dla argonu. Podkreślono wpływ wzbudzenia i relaksacji wibracyjnej i rotacyjnej na rozkłady parametrów w azocie. Wyniki zakończonej wcześniej pracy ukażą się w Transactions of the IFFM na początku 2003 r. [D1-9].

Zaproponowano prosty model kinetyki procesów chemicznych w strimerowym wyładowaniu koronowym. Opracowano program numeryczny CORONA umożliwiający wyznaczenie zmian koncentracji wszystkich składników plazmy wyładowania koronowego dla serii impulsów $E/N(t)$, modelujących strimery. Współczynniki szybkości reakcji pierwotnych w plazmie są w trakcie obliczeń aktualizowane (ELEN-DIF). Formułowanie układu równań różniczkowych zautomatyzowano, stosując bibliotekę podprogramów PLASMAKIN. Wykonano obliczenia testowe. Rezultaty prac przedstawiono w [E2-11, 12; F-1, 5, 32÷34].

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 *Optymalizacja procesów eliminacji tlenków azotu z gazów odlotowych*

ges in time as well as the mesh densities. A final objective of these works is implementation of applied methods in plasma modelling of impulse microwave discharges in contaminated air or flue gases [E2-54; F-50, 51].

Calculated have been spatial distributions of discharge plasma distributions in nitrogen sustained by the surface wave with microwave frequency of 2.45 GHz and compared have been with corresponding distributions for argon. The influence of excitation as well as vibrational and rotational relaxation on the parameter distribution in nitrogen has been stressed. The results of investigations completed earlier will appear in Transactions of the IFFM at the beginning of 2003, [D1-9].

Suggested has been a simple model of chemical kinetics processed in the streamer corona discharge. Developed has been a numerical code CORONA, which enables determination of concentration change of all plasma components of corona discharge in the case of a series of $E/N(t)$ impulses, which model the streamers. The coefficients of primary transformation rate in plasma are updated during calculations (ELEN-DIF). Formulation of a set of differential equations has been automated through incorporation of a subroutine library PLASMAKIN. Performed have been the test calculations. The results of these works have been presented in [E2-11, 12; F-1, 5, 32÷34].

Links with other research topics

Investigations in the frame of the

za pomocą wyładowania koronowego (kier. J. Stańco), *Diagnostyka plazmy mikrofalowej typu 'torch' w gazach ekologicznie szkodliwych* (kier. M. Jasiński), kontraktu z Air Liquide (Francja) *Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas* (kier. Z. Zakrzewski), a także we współpracy z instytucjami w Kanadzie, Niemczech, Republice Czech i Francji.

O3/Z2/T1 Charakterystyki aplikacyjne promieniowania lasera przepływowego CO₂

Opracowano model numeryczny opisujący wpływ zaburzeń jednorodności optycznej medium aktywnego lasera na charakterystyki generowanego promieniowania, a w szczególności na modowe rozkłady pola promieniowania oraz strukturę pola w wiązce wyjściowej lasera [D1-11; E2-48]. W modelu, wpływ ośrodka na charakterystyki modowe opisuje się poprzez współczynnik wzmocnienia, będący nieliniową funkcją natężenia promieniowania w strefie aktywnej. Lokalne zaburzenia ośrodka uwzględniane są w postaci funkcji modyfikującej amplitudę pola promieniowania w rezonatorze i odpowiadającej przestrzennej charakterystyce zaburzenia. Badania przy użyciu modelu wykazały, że zaburzenie ośrodka, np. w postaci strumienia absorbera gazowego o zadanym profilu współczynnika absorpcji, oddziałuje podobnie jak cienka przesłona liniowa lub siatka, prowadząc do zmiany wa-

topic O3/Z1/T1 conducted have been in combination between the statute activity O3/Z3/T2, KBN research topics Optimisation of nitrogen oxide elimination from flue gases by means of corona discharge (led by J. Stańco), Diagnostics of the torch type microwave plasma in ecologically harmful gases (led by M. Jasiński), a contract with the Air Liquide (France) Design and optimization of microwave sources of atmospheric pressure plasmas (led by Z. Zakrzewski) and also in co-operation with institutions in Canada, Germany, Czech Republic and France.

O3/Z2/T1 Application characteristics of CO₂ flow laser radiation

Developed has been a numerical model describing the influence of optical homogeneity disturbance of active laser medium on the characteristics of generated radiation and in particular on the modal distributions of radiation field and the flow structure in the laser output beam [D1-11; E2-48]. In the model the influence of the medium on modal characteristics is described by the gain coefficient, which is a non-linear function of radiation intensity in the active zone. Local disturbances of the medium are considered in the form of a function modifying the amplitude of resonator's radiation field and a corresponding spatial characteristics of the disturbance. Investigations performed using the model shown that the medium disturbance, for example in the form of the ga-

runków generacji różnych modów w rezonatorze. Przejawia się to modulacją struktury pola w wiązce lasera, w zależności od charakterystyk przestrzennych zaburzenia.

Zbadano doświadczalnie warunki transmisji krótkoczasowych impulsów promieniowania w układach światłowodowych dla potrzeb laserowej obróbki materiałów, w szczególności zaś – laserowego oczyszczania obiektów zabytkowych [E1-20; F-41]. Badano dwa standardowe układy światłowodowe (MEDIMED, Warszawa) różniące się średnicą rdzenia, długością oraz typem układu wprowadzającego promieniowanie do światłowodu. Źródło promieniowania stanowił laser Nd-YAG generujący impulsy promieniowania o czasie trwania 6 ns i energii średniej w impulsie regulowanej w zakresie od 1 mJ do 20 mJ. Badania wykazały, że czas trwania impulsu laserowego i związane z nim bardzo wysokie gęstości energii w wiązce skupionej na czole światłowodu stanowią podstawowe ograniczenie transmisji promieniowania badanego lasera przez standardowe układy światłowodowe. Stwierdzono, że bezpieczna i stabilna praca układu laser-światłowód, w przypadku impulsów nanosekundowych, wymaga znacznego ograniczenia energii wprowadzonej na czoło światłowodu; w przypadku badanego lasera do poziomu < 6 mJ.

Nowemu technologicznie sposobowi wzbudzania laserów CO₂, tj. wyładowaniu barierowemu z wykorzystaniem generatora impulsów nanosekundowych, poświęcono pracę obliczeniową [E2-46].

seous absorber stream with a given absorption coefficient reacts similarly as a thin linear diaphragm or a grid leading to the change of conditions of generation of various modes in the resonator. This appears also as a field structure modulation in the laser beam with respect to spatial characteristics of the disturbance.

Experimentally investigated have been the conditions of transmission of short-time radiation impulses in optical waveguides for the purposes of laser material processing in particular in laser refurbishment of monumental objects [E1-20; F-41]. Investigated have been two standard optical waveguide systems (MEDIMED, Warsaw), which differ by the core diameter as well as the length and type of the system introducing radiation into the optical fibre. The Nd-YAG laser served as a radiation source, which generated radiation impulses of 6 ns length and mean impulse energy controlled in the range from 1 mJ to 20 mJ. Investigations proved that the period of time of the laser pulse and the corresponding very high energy rates in the beam focused at the optical fibre face form a major restriction of transmission of radiation of investigated laser by the standard optical fibre arrangements. It has been concluded that a safe and stable operation of the laser-optical fibre system, in the case of nanosecond impulses, requires a significant restriction of input energy to the optical fibre face, in the case of investigated laser to the level less than 6 mJ.

Badano również ośrodek roboczy laserów CO₂ dużej mocy z selektywnym wzbudzeniem azotu w wyładowaniu barierowym [E2-2]. Zbadano teoretycznie (metodą numeryczną Monte Carlo) wielkości stosowane do obliczania przekrojów elektronowych w azocie [E1-2, 5]. W ramach tego zagadnienia na uwagę zasługuje nie do końca wyjaśniona kwestia roli anizotropii przekrojów czynnych. Wymiernym wynikiem prac obliczeniowych jest weryfikacja twierdzenia o użyteczności pewnych konfiguracji przekrojów czynnych, wpływających pozytywnie na proces wzbudzenia [E1-2]. Badania wykonano we współpracy z: P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sci., Moskwa; Institute of Heat & Mass Transfer, Belarus Academy of Sci., Minsk; oraz Faculty of Physics, University of Ghent.

Ponadto w ramach projektów KBN wspierających tematykę statutową wykonano badania doświadczalne prototypu zwierciadła o zmiennym promieniu krzywizny dla laserów CO₂ dużej mocy, [D1-12, 14; E2-49, 51, 52; F-46, 47]. Krzywiznę zwierciadła stanowiącego elastyczną ściankę komory cieczonej regulowano zmianami ciśnienia cieczy w zakresie 0-0.05 MPa. Do potrzeb kontroli kształtu powierzchni opracowano i wdrożono interferencyjne techniki pomiarowe: interferometr typu Michelsona, interferometr z rozdzielaniem frontu falowego, oraz pomiar lokalnych wartości nachylenia frontu falowego analizowanego promieniowania – test Hartmanna.

A research work has been devoted to a new technology of CO₂ laser induction, i.e. a barrier discharge with nanosecond impulse generator [E2-46]. Investigated also has been a working medium of CO₂ cw lasers of large power with a selective nitrogen excitation in barrier discharge [E2-2]. Theoretically investigated have been (using the Monte Carlo method) the quantities used for calculation of electron cross-section in nitrogen [E1-2, 5]. In the frame of that topic the anisotropy of active cross-sections, which is yet to be conclusively explained, focuses most of attention. A measurable result of calculations is verification of the statement about the usefulness of some configurations of active cross-section, which positively influence the excitation process [E1-2]. Investigations have been conducted in cooperation with P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow; Institute of Heat & Mass Transfer, Belarus Academy of Sciences, Minsk; and the Faculty of Physics, University of Ghent.

Additionally, in the frame of KBN projects, which supported the statute activity, performed have been experimental investigations of a prototype of a mirror with a variable curvature radius for CO₂ lasers of large power, [D1-12, 14; E2-49, 51, 52; F-46, 47]. An elastic chamber wall, which reflected the mirror curvature, was controlled by the liquid pressure changes in the range 0-0.05 MPa. For the sake of control of the surface shape developed have been and

Podjęto także, we współpracy z Ośrodkiem O2, nowe zagadnienie diagnostyki procesu spalania węglowodorów. Zbadano eksperymentalnie prędkości frontu spalania [E2-1], oraz referowano wyniki numerycznych obliczeń prędkości spalania oraz poziomu jonizacji gazu w mieszaninie metanu z powietrzem [E2-30], jak również wyniki badań oddziaływania plazmy z powierzchnią z wykorzystaniem modelu “particle-in-cell”, oraz proces formowania plazmy przypowierzchniowej (ang. “plasma sheath”), odgrywającej zasadniczą rolę w pomiarach sondą Langmuira [E2-3, 4] i wyniki obliczeń powstawania tlenku w stanie singletowym w warunkach plazmy nierównowagowej [E2-40].

Powiązanie z innymi tematami badawczymi

Prace dotyczące realizacji tematu O3/Z2/T1 wspierane były projektem badawczym KBN pn. *Kształtowanie charakterystyk przestrzennych i czasowych promieniowania dla potrzeb technologii laserowych* (kier. G. Rabczuk) oraz projektem badawczym KBN pn. *Diagnostyka procesu spalania węglowodorów* (kier. A. Cenian).

implemented interference measurement techniques, namely the Michelson type interferometer, the interferometer with separation of the wave front and measurement of local values of the front wave slope of analysed radiation – the Hartmann test.

In co-operation with the Centre O2 investigated has also been a new issue of the diagnostics of hydrocarbon combustion process. Experimentally investigated have been the velocities of the combustion front [E2-1] as well as presented were the results of numerical calculations of combustion velocity and the level of gas ionization in methane-air mixture [E2-30]. Presented also have been the results of investigations of interaction between plasma and surface using the “particle-in-cell” model and the process of “plasma sheath” formation, which is of fundamental importance in measurements using the Langmuir probe [E2-3, 4]. Finally published have been the results of calculation of oxygen formation in the singlet state under non-equilibrium plasma conditions [E2-40].

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z2/T1 were supported by the KBN research project titled Formation of spatial and time characteristics of radiation for the needs of laser technology (led by G. Rabczuk) and the KBN research project titled Diagnostics of hydrocarbon combustion process (led by A. Cenian).

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

Opublikowano wyniki badań (spektroskopia matrycowa) dotyczące analogów w fazie skondensowanej znanych laserów gazowych i wykonano obliczenia wibracyjnej relaksacji CO₂ w kryształach Ar oraz wyznaczono stałe szybkości na podstawowe procesy relaksacyjne [E2-6]; kinetyki luminescencji F₄₈ w matrycy C₆₀, oraz molekuł O₂, N₂, CO, C₅N₂, N₂O₅ w matrycach stałych Ar i Ne [E1-1, 21, 22]. Badania wykonano we współpracy z Dept. Physical Chem. TU Munich, oraz Inst. Exp. Physics FU Berlin.

Rozwijano prace nad zastosowaniem technik spektroskopowych oraz ablacji laserowej dla potrzeb diagnostyki, monitoringu i renowacji zabytków kultury materialnej [D1-1, 2, 10; E1-5÷7, 17; E2-25, 26, 42÷44; F-14, 45, 46, 48]. W diagnostyce stanu powierzchni obiektów wdrożono mikroskopię skaningową oraz pomiary kolorymetryczne i opracowano projekty nowych stoisk [F-45, 46, 48]. Bogaty materiał doświadczalny dotyczący laserowego czyszczenia powierzchni zabytkowego kamienia (piaskowiec gotlandzki) podsumowano w [D1-2; E1-5, 6; E2-13, 14; F-14]. Przy użyciu technik spektroskopowych LIPS, LIF oraz pomiarów kolorymetrycznych uzyskano szereg oryginalnych wyników dotyczących laserowego oczyszczania historycznych dokumentów (papier: XVI-XVIII w.), [E1-12, 18; E2-42, 43]. Prace wykona-

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

The results of investigations have been published (matrix spectroscopy) regarding the analogs in the condensed phase of known gas lasers and performed have been calculations of a vibrational relaxation of CO₂ in Ar crystal as well as determined has been the influence of constant velocities on basic relaxation processes [E2-6]; luminescence kinetics luminescencji F₄₈ in C₆₀ matrix, and molecules O₂, N₂, CO, C₅N₂, N₂O₅ in solid matrices Ar and Ne [E1-1, 21, 22]. Investigations have been conducted in co-operation with the Department of Physical Chemistry, TU Munich and Institute of Experimental Physics, FU Berlin.

Developed have been works on application of spectroscopic techniques and laser ablations for the needs of diagnostics, monitoring and renovation of monuments of material culture [D1-1, 2, 10; E1-5÷7, 17; E2-25, 26, 42÷44; F-14, 45, 46, 48]. A scanning microscopy has been implemented in diagnostics of the state of object surface as well as calorimetric measurements, developed have been the designs of new rigs [F-45, 46, 48]. An broad experimental evidence regarding the laser cleaning of a surface of monumental stone (Gothland sandstone) has been summarized in [D1-2; E1-5, 6; E2-13, 14; F-14]. Using the spectroscopic techniques LIPS, LIF together with calorimetric measurements obtained have been a series of original re-

no we współpracy z instytutami: Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa UMK w Toruniu, ICP/CSIC w Madrycie oraz wydziałem Fizyki Tech. i Matematyki Stos. PG w Gdańsku i School of Conservation w Kopenhadze.

Podjęto systematyczne prace doświadczalne nad przyczynami wad w mikrostrukturach powłok z laserowo przetapianych proszków metalicznych [D1-4÷7; E1-11; E2-20÷23; F-21, 22]. Z uwagi na aspekt aplikacyjny pracy badano materiały typowo używane w przemyśle turbinowym; podłoża – stale stopowe, żaroodporne, oraz powłoki – stopy na bazie niklu i kobaltu (Stellit 6, Metco 16C). Powierzchnie oraz przekroje próbek analizowano przy użyciu technik: SEM, XEDS, wykonano pomiary mikrotwardości i testy korozyjne. Wyniki potwierdziły pozytywny wpływ wstępnego podgrzewania materiału podłoża; dla zakresu temperatur podgrzewania 780-1000 K uzyskano próbki wolne od wad struktury. Planowana kontynuacja tematyki przewiduje opracowanie modelu obliczeniowego (wspólnie z Ośrodkiem O4 IMP PAN, W. Ostachowicz, M. Krawczuk) oraz wyjaśnienie tego efektu umożliwiające wybór parametrów procesu.

Prace prowadzono wspólnie z Politechniką Gdańską (Wydz. Mechaniczny, Wydz. Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej), Instytutem Elektroniki BAN (Sofia), oraz Instytutem Metalurgii CENIM/CSIC (Madryt).

sults regarding laser cleaning of historic documents (paper: XVI-XVIII century), [E1-12, 18; E2-42, 43]. The works have been conducted in co-operation with the Inst. of Monumental Studies and Conservatory of Toruń Uni., ICP/CSIC Madrid, the Faculty of Tech. Physics and Applied Mathematics of Tech. Uni. of Gdańsk and the School of Conservation in Copenhagen.

Systematic experimental works have started on determination of the influences of defects in shell microstructures made of metallic powders, remelted using the laser [D1-4÷7; E1-11; E2-20÷23; F-21, 22]. Due to application aspect of the work investigated have been materials which are typically used in turbine industry such as: foundation – alloys and heat-resisting steels, and shells – nickel and cobalt based alloys (Stellit 6, Metco 16C). Sample surfaces and cross-sections were analysed using SEM and XEDS techniques. Performed have been measurements of microhardness and corrosion tests. The results confirmed a positive influence of preliminary heating of the foundation material. In the temperature range of heating from 780 to 1000 K structural-defect free samples have been obtained. A planned continuation of the scope of work envisages development of a calculation model (together with the Centre O4, W. Ostachowicz, M. Krawczuk) as well as explanation of such effect enabling the selection of the process parameters.

The works have been conducted together with the Gdańsk University of

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 stelliteowe dla potrzeb stereolitografii laserowej oraz regeneracji* (kier.: G. Śliwiński),
- projektu badawczego KBN SPUBM/COST *Technika laserowa w konserwacji obiektów zabytkowych* (kier. G. Śliwiński),
- projektu badawczego KBN *Zbadanie wpływu parametrów laserowego napawania warstw stelliteowych na ich odporność erozyjną w wyniku mikropeknięć* (kier.: R. Jendrzejewski),
- projektu badawczego KBN *Laserowe oczyszczanie powierzchni zabytkowych z kamienia* (kier.: M. Jankowska).

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

Badania wykonywano w ramach dwóch zadań: *Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów*

Technology (Faculty of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Physics and Applied Mathematics), Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences and the Institute of Metallurgy CENIM/CSIC (Madrid).

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z2/T2 conducted have been in combination with the studies conducted in the frame:

- *KBN research project No. 129/T08/98/15 Multilayer stellite structures for laser stereolithography and regeneration (led by: G. Śliwiński),*
- *KBN research project SPUBM/COST Laser technique in conservation of monumental objects (led by G. Śliwiński),*
- *KBN research project Investigations of the influence of parameters of laser coating of stellite layers on their erosion resistance due to microcracks (led by: R. Jendrzejewski),*
- *KBN research project Laser cleaning of monumental surfaces from stone (led by: M. Jankowska).*

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

Investigations have been conducted in the frame of two topics: Application of laser technique for flow visualisation

oraz *Zastosowanie techniki laserowej do mikroobróbki materiałów*. Obydwa zadania 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.

Zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów Zadanie to 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 rozprawie magisterskiej J. Dekowskiego pt. *Modelowanie numeryczne i badania doświadczalne pola prędkości gazu i rozkładu gęstości pyłu w modelu elektrofiltru* [B-1], 4 referatach konferencyjnych [E2-8, 27, 33, 34] oraz 2 opracowaniach IMP PAN [F-23, 29].

Wyniki dotyczące pomiarów pól prędkości w modelach reaktorów plazmowych opublikowano w [E1-14, 19; E2-7, 33; F-40].

and Application of laser technique for material microprocessing. Both topics are related through the laser source (an impulse CuBr laser or Nd:YAG impulse laser with dual frequency transmission), which can be applied both for flow visualisation and material microprocessing.

Application of laser technique for flow visualisation That topic regarded application of CuBr and Nd:YAG lasers for visualisation of gas flows and measurements of velocity fields using the Particle Image Velocimetry (PIV). In the frame of that topic performed have been investigations of velocity field distribution in flows, where the electric field is present, i.e. in:

- models of electrofilters,
- some models of plasma reactors for purification of flue gases from harmful gases.

The results regarding measurements of velocity fields in models of electrofilter have been published in the Master of Sciences dissertation by J. Dekowski titled Numerical modelling and experimental investigations of gas velocity fields and distribution of dust density in the model of electrofilter [B-1], 4 conference papers [E2-8, 27, 33, 34] and two IFFM PAS internal reports [F-23, 29].

The results regarding measurement of velocity fields in models of plasma reactors have been published in [E1-14, 19; E2-7, 33; F-40].

Badania były wykonane 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).

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 gazów potwierdziły rezultaty badań zapoczątkowanych w ubiegłym roku, z których wynika, że w procesie oczyszczania bierze udział nie tylko obszar, gdzie istnieje plazma, ale także uczestniczą w nim obszary pozaplazmowe, do których wskutek elektrohydrodynamicznego przepływu wtórnego napływają z obszaru plazmowego cząsteczki chemicznie aktywne, które zostały wytworzone w obszarze plazmowym, [A-1].

Zastosowanie techniki laserowej do mikroobróbki materiałów Zadanie to dotyczyło rozwoju systemu laserowego MOPA (*Master Oscillator – Power Amplifier*) CuBr oraz jego zastosowania do precyzyjnej obróbki materiałów i do badania charakterystyk termicznych elementów półprzewodnikowych, [E2-25, 27, 34; F-30].

Najważniejsze rezultaty tego zadania to dalsza modyfikacja unowocze-

Investigations have been conducted in co-operation 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).

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

Investigations of flow in models of non-thermal plasma reactors for purification of flue gases from harmful substances confirmed the results of investigations commenced in previous years, where from it results that in the purification process not only the region where plasma is present takes part in the process, but also the non-plasma regions, where, due to electrohydrodynamic secondary flows chemically active particles are gathering, which have been formed in the plasma region, [A-1].

Application of plasma technique for material microprocessing *That topic regarded the development of a CuBr MOPA laser system (Master Oscillator – Power Amplifier) and its application in precision material processing as well as in investigations of thermal characteristics of semiconductor elements, [E2-25, 27, 34; F-30].*

The most important result stemming from realization of that topic is

śniająca 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 μs). Dzięki temu w pełni wykorzystuje się wszystkie zalety przemieszczania wiązki laserowej po powierzchni materiału za pomocą skanera laserowego, czego dotąd nie można było uczynić 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* (kier. J. Mizeraczyk), projektu badawczego KBN PB 1498/T11/02/22 pn. *Zastosowanie*

further modification of MOPE CuBr laser system for precision material processing. At present, the MOPA CuBr laser system consist of two laser tubes (MO – master oscillator and PA – power amplifier) as well as MTS system for synchronisation of discharge impulses in both tubes. Due to such design the generation capabilities of CuBr laser are significantly increased. The selection of repeating frequency becomes feasible 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 diaphragm for blocking the laser beam (shuttle speed of about few μs). Due to that fact all advantages of displacement of the laser beam on the material surface by means of laser scanner are fully utilized, which so far could not be done due to insufficient speed of used mechanical shuttle. At the moment the developed and built MOPE CuBr laser system is one of the most advanced devices of that type in Europe.

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z3/T1 have been conducted in combination with the works realised in the frame of KBN research project 1756/T10/01/21 titled Investigations of flue gas velocity fields in models of electrofilters by means of laser methods in view of optimization of dedusting process (led by J. Mizeraczyk), KBN research project 1498/T11/02/22 titled Application of CuBr laser of new

lasera CuBr nowej generacji do badania przejściowych charakterystyk termicznych elementów półprzewodnikowych (kier.: M. Kocik) oraz 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 ze szkodliwych składników gazowych.

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

1. eliminację tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze plazmy nietermicznej z katalizatorem (reaktor ze stałonaładowanym dodatnim wyładowaniem koronowym),
2. rozkład freonów za pomocą wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia”,

generation for investigations of transient thermal characteristics of semiconducting elements (led by: M. Kocik) as well as a research project of the Foundation for Polish Science Theoretical and experimental investigations of exhaust velocity fields in models of electrofilters in view of optimization of dedusting process.

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

A long-term objective of investigations conducted in the Division of Plasma and Laser Technology Applications is the development of new, effective and pro-ecological plasma methods for purification of different types of flue gases from harmful gaseous components.

The scope of this year activities regarding application of plasma techniques for purification of flue gases encompassed:

1. *elimination of nitrogen oxides from flue gas simulators in non-thermal plasma reactors with a catalyst (a reactor with a positive constant voltage corona discharge),*
2. *freon decomposition by means of the torch type microwave discharge,*

3. efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej,
 4. zastosowanie techniki spektroskopii indukowanej laserem (Laser Induced Spectroscopy) do pomiarów czasowo-przestrzennych rozkładów cząstek aktywnych w plazmie nietermicznej stosowanej do dekompozycji tlenków azotu,
 5. badania właściwości różnych modów wyładowania koronowego,
 6. modelowanie kinetyki reakcji chemicznych w strimerze wyładowania koronowego.
3. *electrohydrodynamic effect in non-thermal plasma reactors,*
 4. *application of Laser Induced Spectroscopy for time and space measurements of distributions of active particles in non-thermal plasma used in decomposition of nitrogen oxides,*
 5. *investigations of properties of various modes of corona discharge,*
 6. *modelling of kinetics of chemical reactions in the corona discharge streamer.*

Badania eliminacji tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze ze stałonapięciowym 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, [E1-3; E2-9, 31; F-6, 9, 19, 40].

Badania rozkładu freonów za pomocą wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” były wykonywane wspólnie z zespołem badawczym Zakładu Elektrodynamiki Gazów Zjonizowanych O3/Z1, kierowanym przez prof. Z. Zakrzewskiego. Głównym ich wynikiem jest opracowanie wysokoefektywnej metody dekompozycji freonów za pomocą plazmy mikrofalowej pod ciśnieniem atmosferycznym. Innym ważnym rezultatem jest opracowanie spektroskopowej metody pomiaru temperatury gazu roboczego w plazmie mikrofalowej, [E1-8, 9, 16; E2-15÷19; F-17, 18, 20, 34].

Investigations of nitrogen oxides elimination from flue gas simulators in the constant-voltage reactor with positive corona discharge in the presence of the catalyst borne fruits in increasing the degree of nitrogen oxides NO and NO₂ elimination up to 96% at lower energy consumption when compared against a sole corona discharge, [E1-3; E2-9, 31; F-6, 9, 19, 40].

Investigations of freon decomposition by means of the torch microwave discharge have been performed together with the research group from the Ionised Gases Electrodynamics Division O3/Z1, led by professor Z. Zakrzewski. The major result of that co-operation is the development of highly effective method of freon decomposition by means of microwave plasma under atmospheric pressure. Another important result is the development of a spectroscopic method of a working gas temperature in microwave plasma, [E1-8, 9, 16; E2-15÷19; F-17, 18, 20, 34].

Badania efektu elektrohydrodynamicznego w reaktorach plazmy nietermicznej dotyczyły spektrofotometrycznych pomiarów stężeń NO oraz O₃ produkowanego w wyładowaniu koronowym i transportowanego 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, [E1-4, 15; E2-31, 35, 36, 47; F-7, 31].

W ramach współpracy z Oita University, Dept. 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. 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 r. 2002 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”, [E2-39, 50; F-8].

W ramach badań właściwości różnych modów wyładowania koronowego uwagę skupiono na charakterystykach

Investigations of the electrohydrodynamic effect in non-thermal plasma reactors regarded spectrophotometric measurements of NO and O₃ concentrations produced during corona discharge and transported upstream the gas flow by the secondary flow induced by discharge. Obtained results of investigations confirmed the influence of electrohydrodynamic effect on the effectiveness of flue gases purification in non-thermal plasma reactors, [E1-4, 15; E2-31, 35, 36, 47; F-7, 31].

In the frame of co-operation with professor T. Ohkubo from the Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, continued have been works on application of Laser Induced Spectroscopy for time and space measurements of active particles in non-equilibrium plasma used for decomposition of nitrogen oxides. Laser Induced Spectroscopy is a modern research tool of, amongst the others, non-thermal plasma, which effectively supports experimental and numerical investigations of harmful gases decomposition by means of plasma catalysis. In 2002 the major result of investigations regarding application of Laser Induced Spectroscopy for decomposition of nitrogen oxides was a spatial measurement of the degree of decomposition of NO in the “corona radical shower” type reactor, [E2-39, 50; F-8].

In the frame of investigations of properties of various modes of corona discharge attention was focused on elec-

elektrycznych dwóch podstawowych modów wyładowania koronowego, jarzeniowego i strimerowego, które są najważniejsze z punktu widzenia wykorzystania wyładowania koronowego do dekompozycji szkodliwych gazów. Pomierzone przestrzenne rozkłady obu modów wyładowania koronowego zostaną wykorzystane do optymalizacji reaktorów plazmowych, [E2-53].

Modelowanie kinetyki reakcji chemicznych w strimerze wyładowania koronowego prowadzono wspólnie z zespołem badawczym Zakładu Elektrodynamiki Gazów Zjonizowanych O3/Z1, kierowanym przez prof. Z. Zakrzewskiego. Głównym wynikiem modelowania jest opracowanie programu komputerowego umożliwiającego obliczanie kinetyki reakcji chemicznych dla zmiennej, a nie stałej jak dotychczas, zredukowanego natężenia pola elektrycznego. Opracowany program umożliwia opisywanie zmian zredukowanego natężenia pola elektrycznego w strimerze wyładowania koronowego za pomocą dowolnej funkcji, [E2-11, 12, 41; F-33, 40].

Badania wykonano we współpracy z Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering w Japonii, (prof. T. Ohkubo) i McMaster University, Department of Engineering Physics w Hamilton, Kanada, (prof. J.-S. Chang). W ramach tematu 3 współpracowano również z Comenius University, Faculty of Physics and Mathematics w Bratysławie, Słowacja, (prof. J. Skalný).

trical characteristics of two basic modes of corona discharge, namely the glow and streamer discharges, which are most important from the point of view of application of corona discharge in decomposition of flue gases. Measured spatial distributions of both modes of corona discharge will be used in optimization of plasma reactors, [E2-53].

Modelling of the kinetic of chemical reactions in the streamer of corona discharge conducted has been together with the research team from the Ionised Gas Electrodynamics Division O3/Z1, led by professor Z. Zakrzewski. The main result of modeling is development of a computer code enabling calculation of the kinetics of chemical reactions in the case of variable, and not the constant as up to date, reduced electric field intensity. Developed code enables description of changes of a reduced electric field intensity in the streamer of corona discharge by means of an arbitrary function, [E2-11, 12, 41; F-33, 40].

Investigations have been conducted in co-operation with the Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering from Japan, (professor T. Ohkubo) and McMaster University, Department of Engineering Physics w Hamilton, Canada, (professor J.-S. Chang). In the frame of the topic No. 3 the group co-operated with the Comenius University, Faculty of Physics and Mathematics from Bratislava, Slovakia, (professor J. Skalný).

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 Z. Zakrzewskiego: O3/Z1/T1 *Generacja i modelowanie plazmy w wyładowaniu mikrofalowym*, oraz projektu badawczego KBN PB 0446/T09/00/19 *Optymalizacja procesów eliminacji tlenków azotu z gazów odlotowych za pomocą wyładowania koronowego* (kier. J. Stańco).

Jerzy Mizeraczyk

Links with other research topics

The works regarding realisation of the topic O3/Z3/T2 have been conducted in combination with the statute works related to the topic O3/Z1/T1 led by Z. Zakrzewski titled Generation and modelling of plasma in microwave discharge, and the KBN research project 0446/T09/00/19 Optimisation of elimination processes of nitrogen oxides from flue gases by means of corona discharge (led by J. Stańco).

Translated by Dariusz Mikielwicz