

O3

Zagadnienia techniki plazmowej i laserowej

Problems of Plasma and Laser Engineering

W 2006 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: dr inż. M. Jasiński).

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 Zastosowania techniki laserowej, (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 źródeł plazmy oraz diagnostyka i modelowanie plazmy. Wszystkie prace prowadzone

In 2006, 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 the Ministry of Science and Higher Education (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: Dr. M. Jasiński).

Z-2/T1 Application characteristics of technological intense laser beams, (Coordinator: Professor G. Śliwiński).

Z-3/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 as well

w 2006 r. dotyczyły generatorów plazmy na częstotliwości 2,45 GHz i wyładowań pod ciśnieniem atmosferycznym.

W okresie sprawozdawczym kontynuowano rozbudowę i modernizację bazy eksperymentalnej Zakładu. Było to możliwe, między innymi, dzięki finansowaniu prac przez koncern Air Liquide (Francja). W rezultacie dysponujemy kilkoma niezależnymi stanowiskami dla badania i użytkowania mikrofalowych generatorów plazmy, pracującymi na zalecanej dla stosowania w przemyśle częstotliwości mikrofal 2,45 GHz i wyposażonymi w układy zasilania, kontroli i pomiaru mocy mikrofal i wydatku gazów roboczych.

Główny wysiłek badawczy Zakładu włożono w wykonanie prac związanych z opracowaniem i optymalizacją mikrofalowych źródeł plazmy. Ta prowadzona od kilku lat tematyka, jest obecnie realizowana w ramach działalności statutowej, kontraktu z Air Liquide (Francja) i projektu badawczego MNiSW PB 3020/T02/2006/31. 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

as diagnostics and plasma modelling. All works carried out in 2006 regarded plasma generators at frequency 2.45 GHz and discharges under atmospheric pressure.

In the reporting year continued has been extension and modernisation of experimental facilities at the Department. That was possible thanks to, amongst the others, financing 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 frequency of 2.45 GHz equipped with supply systems, control and measurement of microwave output power and flowrates of working gases.

The principal research effort of the Department has been put into carrying out works related to development and optimisation of microwave plasma sources. This kind of activities, carried out for several years now, is presently realised in the frame of statute activity and a contract with Air Liquide (France) and a Ministry of Science and Higher Education research project PB 3020/T02/2006/31. Their objective is optimisation of existing and development of new, more refined microwave plasma generators used in industrial technologies for 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 model-*

mocy do plazmy i stabilności pracy generatorów,

- analizę wpływu warunków wyładowania oraz czynników geometrycznych na przebieg procesów chemicznych.

W wyniku powyższych prac powstają nowatorskie konstrukcje generatorów plazmy o wymaganych parametrach elektrodynamicznych.

W roku 2006 opracowane zostały dwa nowego typu urządzenia do generacji wyładowań mikrofalowych pod ciśnieniem atmosferycznym:

- mikrofalowe urządzenie do plazmowej obróbki gazów o dużych natężeniach przepływu;
- mikrofalowe urządzenie do generacji mikrowyładowań w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym.

Pierwsze z tych urządzeń ma konstrukcję falowodową i służy do plazmowej obróbki gazów o dużych natężeniach przepływu, spełnia więc wymagania przemysłu. Opracowane urządzenie zapewnia efektywny transfer mocy mikrofal (od 0,6 kW do 6 kW) do obszaru wyładowania w szerokim zakresie natężeń przepływu gazu (od 30 l/min do kilkuset l/min). W najbliższym czasie przeprowadzone zostaną badania spektroskopowe generowanych wyładowań oraz badania nad plazmową obróbką gazów o dużych natężeniach przepływu (wytwarzanie wodoru, destrukcja czynników chłodniczych).

ling 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.

In 2006 developed have been two new types of devices for microwave plasma generators under atmospheric pressure:

- *microwave device for plasma processing of gases with large flow rates;*
- *microwave devices for generation of microdischarges in gases under atmospheric pressure.*

First of these devices has a waveguide construction and serves for plasma processing of gases with large flow rates and hence obeys the industrial requirements. The developed device ensures effective power transfer of microwaves (ranging from 0.6 kW to 6 kW) to the discharge region with a wide flow rate of gas (from 30 l/min to several hundreds of l/min). In the near future carried out

Drugie z opracowanych urządzeń ma konstrukcję współosiową i służy do generacji mikrowyładowań w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym. Szeroki zakres regulacji temperatury plazmy (od kilkudziesięciu do kilku tysięcy stopni Celsjusza) powoduje, że obszar zastosowań opracowanego urządzenia mikrofalowego może być bardzo różnorodny: medycyna (sterylizacja, precyzyjna chirurgia, destrukcja bakterii i wirusów), mechanika (modyfikacja i obróbka powierzchni, spawanie wysokiej precyzji), źródła światła (promieniowanie widzialne i UV).

W roku 2006 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. Koncentrację elektronów wyznaczono w oparciu o dwie teorie: Gig-Card i GKS. Metoda wykorzystana została do pomiaru koncentracji elektronów w wyładowaniu mikrofalowym typu 'torch' oraz wyładowaniu podtrzymywanym falą powierzchniową.

Jako rezultat otrzymano rozkład koncentracji elektronów wzdłuż wyładowań dla różnych mocy mikrofal i natężeń przepływu gazów. Uzyskane wartości koncentracji elektronów są zgodne z wartościami prezentowanymi w literaturze. Ponadto rozkłady koncentracji elektronów wzdłuż wyładowań są zgodne z teorią wyładowania podtrzymywanego falą powierzchniową. Wyładowania generowane były w ar-

will be spectroscopic investigations of generated discharges as well as investigations on plasma processing of gases with large flow rates (production of hydrogen, destruction of refrigerants).

The second of the developed devices has a coaxial structure and serves for generation of microdischarges in gases under atmospheric pressure. A wide range of plasma temperature control (from a few tens up to a few thousands of degrees Celsius) renders that the scope of applications of developed microwave device can be very general ranging from medicine (sterilization, precision surgery, battery and virus destruction), mechanics (modification and surface processing, high precision welding), light sources (visible radiation and UV).

In 2006 continued have been spectroscopic investigations of electron concentration in plasma. The method is based on determination of the Stark line of $H\beta$ atomic line emitted by plasma as it is directly dependent on electron concentration in a given plasma. Concentration of electrons has been determined based on two theories: Gig-Card and GKS. The method has been used for measurements of electron concentration in "torch" type microwave discharge as well as a discharge sustained by the surface wave.

As a result obtained has been the distribution of electron concentration along discharges for different microwave powers and gas flow rates. Obtained values of electron concentration are consistent with the values presented in lit-

gonie lub neonie pod ciśnieniem atmosferycznym.

W 2006 roku wprowadzono nową diagnostyczną metodę spektroskopową polegającą na jednoczesnym wyznaczeniu koncentracji elektronów i temperatury elektronów w plazmie wyładowania w neonie. Metoda opiera się na wyznaczeniu poszerzeń Starka linii atomowych $H\beta$ oraz $H\gamma$ emitowanych przez plazmę i wyznaczeniu graficznej zależności pomiędzy koncentracją elektronów a temperaturą elektronów. Przecięcie przebiegów zależności koncentracji elektronów od ich temperatury dla linii atomowych $H\beta$ oraz $H\gamma$ wyznacza jednocześnie koncentrację i temperaturę elektronów w plazmie.

Część prac wykonywanych w ramach tematu O3/Z1/T1 dotyczyła zastosowań wyładowań mikrofalowych w ochronie środowiska. Prace te, koordynowane przez zespół Prof. Mizeraczyka, prowadzone były w przeważającej części jako zadania tematu O3/Z3/T2.

Prace eksperymentalne dotyczące wyładowań podtrzymywanych falą powierzchniową skoncentrowane były na badaniu wpływu warunków wyładowania i jego parametrów na długość kolumny plazmy w warunkach pracy ciągłej i impulsowej. Dla ciągłego wyładowania w argonie wyznaczono spektroskopowo widmo promieniowania oraz badano zmiany natężenia wybranej linii widmowej wzdłuż kolumny plazmy.

W ramach działalności statutowej

erature. Additionally, distributions of electron concentrations along discharges are consistent with a theory of discharge sustained by a surface wave. Discharges generated were in argon or neon under atmospheric pressure.

In 2006 introduced has been a new diagnostic spectroscopic method based on simultaneous determination of electron concentration and electron temperature in plasma discharge in neon. The method is based on determination of extension of the Stark atomic lines of $H\beta$ and $H\gamma$ emitted by plasma and determination of graphical relation between electron concentration and electron temperature. Interception of distributions of electron concentration on their temperature for atomic lines $H\beta$ and $H\gamma$ determines at the same time concentration and temperature of electrons in plasma.

Part of works carried out in the frame of the topic O3/Z1/T1 regarded application of microwave discharges in environmental protection. These activities, coordinated by the group led by Professor Mizeraczyk, were carried out mainly as parts of the topic O3/Z3/T2.

Experimental works regarding discharges sustained by the surface wave were concentrated on investigations of the influence of conditions of discharge and its parameters on the length of plasma column under conditions of continuous and impulse operation. In the case of continuous discharge in argon determined was, in a spectroscopic way, the spectrum of radiation and investigated were changes of intensity of se-

badano eksperymentalnie strukturę mikrofalowego wyładowania typu 'torch'. Obiektem badań było wyładowanie w argonie pod ciśnieniem atmosferycznym przy małym natężeniu przepływu gazu (do 3 l/min) i poziomie mocy mikrofal do 1 kW. Badania wykonano zarówno w trybie pracy ciągłej jak i impulsowej. Polegały na wykonywaniu serii zdjęć przy użyciu szybkiej kamery cyfrowej, które później poddane były komputerowej obróbce.

W zakresie badań numerycznych prowadzono obliczenia czasu zaniku kolumny plazmy wyładowania w argonie w trybie pracy impulsowej. Analiza posłużyła wyjaśnieniu wyznaczonej w eksperymencie zależności długości kolumny plazmy od parametrów impulsów mocy mikrofal.

W 2006 r. kontynuowano prace nad doskonaleniem modelu wyładowania mikrofalowego podtrzymywanego falą powierzchniową w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym. Opracowany w latach poprzednich model wyładowania w argonie zastosowano do wyładowania z falą powierzchniową w neonie. Model został ponadto uzupełniony o równania opisujące radialne rozkłady składowych pola elektromagnetycznego fali podtrzymującej wyładowanie. W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano charakterystyki fazowe i charakterystyki tłumienia fali podtrzymującej wyładowanie. Otrzymano również przestrzenne rozkłady parametrów plazmy: koncentracji elektronów, temperatury gazu, temperatury elektronów. Wyniki te zostały

lected spectral line along the plasma column. In the frame of statute activity experimentally investigated was a structure of microwave discharge of the "torch" type. The object was a discharge in argon under atmospheric pressure at small flow rate of gas (up to 3 l/min) and a level of microwaves up to 1 kW. Investigations were carried out both in the mode of continuous operation and impulse operation. They were based on capturing of a series of photographs using the fast digital camera, which were later exposed to numerical processing.

In the frame of numerical investigations carried out were calculations of disappearance of discharge plasma column under the impulse operation. Analysis served for explanation of experimentally determined relation between the length of plasma column and impulse parameters of microwave power.

In 2006 continued were activities on modification of a model of microwave discharge sustained by a surface wave in gases under atmospheric pressure. Developed in earlier years model of discharge in argon has been implemented to discharge featuring the surface wave in neon. The model has additionally been supplemented with an equation describing radial distributions of electromagnetic field components of a wave sustaining the discharge. As a result of numerical calculations obtained have been phase characteristics and damping characteristics of a wave sustaining the discharge. Obtained have also been

porównane z wynikami eksperymentów wziętymi z literatury oraz eksperymentów przeprowadzonych w IMP PAN. Zgodność okazała się bardzo dobra.

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

Jednym z zadań badawczych realizowanych w roku 2006 w ramach tego tematu było formowanie przestrzennych charakterystyk promieniowania w układzie lasera technologicznego dużej mocy przy zastosowaniu elementów optyki adaptacyjnej.

Prace miały na celu na celu zbadanie wpływu asferycznych deformacji wielokanałowego zwierciadła adaptacyjnego w rezonatorze lasera dużej mocy, na charakterystyki generacyjne lasera, takie jak: poziom mocy, jakość wiązki, skład modowy.

Przedmiotem analizy było siedmiokanałowe bimorficzne zwierciadło deformowalne (DM), pracujące w modzie zwierciadła dwukanałowego (kanał centralny oraz kanał pierścieniowy złożony z segmentów zewnętrznych), umożliwiające generację asferycznych deformacji frontu falowego o symetrii osiowej. W szczególności badano wpływ deformacji typu:

- AS1 – generowanych przy odkształcaniu centralnego obszaru zwierciadła w stronę profili wypukłych, zaś pierścienia obejmującego kanały zewnętrzne w stronę profili wklęsłych,

spatial distributions of plasma parameters: electron concentration, gas temperature, electron temperature. These results have been compared with the results of experiments taken from literature as well as experiments carried out at IMP PAN. The consistency between the results was very good.

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

One of the research problems underway in 2006 in the frame of the above topic was formulation of spatial characteristics of radiation within the system of technological laser of large power using elements of adaptive optics.

The works were aimed at investigation of the influence of aspheric deformation, of a multi channel adaptive mirror in a laser resonator of large power, on laser generation characteristics such as the level of power, quality of the beam, modal composition.

The subject of analysis was a seven-channel biomorphic deformable mirror (DM), operating in a mode of two-channel mirror (central channel and annular channel consisting of external segments), enabling generation of aspheric deformations of a wave front with an axial symmetry. In particular investigated was the influence of deformations of a type:

- AS1 – generated during deformation of a central region of the mirror towards convex profiles, whereas of the ring encompassing external channels towards concave profiles,

- AS2 – kiedy zewnętrzny pierścień odkształcany jest w kierunku profili wypukłych, zaś segment centralny jest maksymalnie odkształcony w stronę profili wklęsłych.
- AS2 – when the external ring is deforming towards the direction of convex profiles, whereas the central segment is maximally deformable towards concave profiles.

Zgodnie z wynikami modelu teoretycznego rezonatora zawierającego zwierciadło asferyczne typu AS1, ze wzrostem stopnia asferyczności kształtu zwierciadła, w wyniku wzrostu lokalnej wartości krzywizny strefy centralnej (w obszarze $1/R < 0$, R – promień krzywizny), obserwuje się wzrost średnicy modu podstawowego, przy jednoczesnym spłaszczeniu około-osioowego obszaru maksymalnej intensywności.

Analiza profili eksperymentalnych wiązki wielomodowej układu rzeczywistego, rejestrowanych dla tak deformowanych zwierciadeł, wykazuje podobny efekt – wyraźnego spłaszczenia i ujednorodnienia profilu wiązki przy niewielkich zmianach poziomu mocy wyjściowej z lasera.

W przypadku zwierciadeł asferycznych typu AS2, efekt „czyszczenia” struktury modowej obserwowany w miarę wzrostu napięć deformujących podawanych na zewnętrzny pierścień zwierciadła, jest znacznie silniejszy niż ten obserwowany przy zmianach krzywizny standardowego zwierciadła o profilu sferycznym wprowadzonym w rezonator lasera, a osiągnięte wartości mocy znacząco większe. Wykazanie możliwości kontroli składu modowego wiązki promieniowania z lasera, (którego wiązka standardowa jest wielomodowa) w tym możliwości uzyskania pracy jednodomowej typu TEM00 a także TEM01 – z zachowaniem wyso-

In line with the results of theoretical model of a resonator, containing aspheric mirror of AS1 type, accompanying the increase of asperity of the mirror shape, due to the increase of local value of central zone curvature (in the region $1/R < 0$, R – radius of curvature), is observed the increase of diameter of the basic mode at simultaneous flattening of a near symmetry axis of maximum intensity.

Analysis of experimental profiles of a multi-mode beam of a real system recorded for deformable mirrors shows a similar effect of a clear flattening and homogeneity of a beam profile at small changes of the output level of power from the laser.

In the case of aspheric mirrors of AS2 type, the effect of “purification” of modal structure is observed progressively with the increase of deformable voltages exposed to external ring of the mirror, is significantly stronger than that observed during the changes of curvature of a standard mirror with spherical profile introduced into the laser resonator and obtained values of power are significantly greater. Proving the capability of controlling the modal composition of radiation beam from a laser, of which the standard beam is multimodal, including possibility of obtain-

kiego poziomu mocy, to ważny rezultat wykonanych badań.

Istotną częścią prac w 2006 było zbadanie możliwości uformowania wiązki o założonym profilu rozkładu natężenia pola na wyjściu z rezonatora (tzw. ‘custom modes’) np. profilu typu supergaussa rzędu czwartego lub szóstego, które to profile są często pożądane dla różnorodnych aplikacji technologicznych. W ramach tej części zadania opracowano:

- algorytm obliczeniowy typu dyfrakcyjnego dla propagacji wstecznej w rezonatorze, z uwzględnieniem specyfiki i ograniczeń układów optycznych badanych laserów technologicznych, umożliwiając wyznaczenie profilu zwierciadła wymaganego dla wygenerowania wiązki o założonych charakterystykach modowych,
- algorytm obliczeniowy umożliwiający określenie napięć kontrolnych na kanałach aktywnych badanego zwierciadła deformowalnego, niezbędnych do wygenerowania profilu zwierciadła (wyznaczonego w kroku 1) zapewniającego pożądaną zmianę charakterystyk fazowych pola promieniowania w rezonatorze a tym samym odpowiednie uformowanie charakterystyk amplitudowych wiązki na wyjściu z lasera.

Wyniki potwierdziły możliwość generacji wiązki supergaussowskiej (SG) przy zastosowaniu zwierciadeł asferycznych typu AS1. Wykazano uformowanie wiązki SG rzędu czwartego poprzez odpowiednie ukształtowanie profilu

ing single mode operation of TEM00 as well as TEM01 type, assuring a high level of power shows an important result of completed investigations.

An important part of works in 2006 was investigation of a possibility of formation of a beam with specified profile of the field intensity distribution at the outlet from resonator, so called “custom modes”, such as a profile of the super Gauss type of fourth or sixth order, which are often required for different technological applications. In the frame of that part of the problem the following items have been elaborated:

- *calculation algorithm of diffractive type for the case of backward propagation in resonator with account of specifics and restrictions of optical systems of investigated technological lasers, enabling determination of the mirror profile required in generation of a beam with specified modal characteristics,*
- *calculation algorithm enabling determination of control voltages in the active channels of investigated deformable mirror, indispensable for generation of mirror profiles (determined in step 1) ensuring required change of phase characteristics of radiation field in resonator and at the same time relevant formation of amplitude characteristics of a beam at laser output.*

zwierciadła deformowalnego wprowadzonego w rezonator lasera technologicznego cw CO₂.

Kolejne analizy wykazały, że uformowanie wiązki SG rzędu 6 wymaga aktywacji segmentów kontrolnych napięciami spoza zakresu dostępnego dla badanego zwierciadła DM. W celu kontynuacji doświadczeń niezbędne są niewielkie modyfikacje w układzie kontrolnym tego zwierciadła, które umożliwią odpowiednie zmiany jego charakterystyk deformacyjnych a tym samym uformowanie wiązki o pożądanym rozkładzie intensywności, tj. wiązki SG, $n = 6$.

Kolejne zadanie realizowane w temacie O3/Z2/T1 dotyczyło procesów mikroskopowych w plazmie wyładowań. W ramach tego zadania opracowano monograficzny przegląd literatury oraz wyników własnych, dotyczący ośrodka aktywnego laserów CO₂, w szczególności związany z modelowaniem wyładowania i procesów kinetyki plazmowej.

Ponadto, wykonano badania frontu spalania plazmy generowanej w płomieniach węglowodorowych. Wyniki doświadczalne uzyskane przy użyciu techniki spektroskopii masowej porównano z wynikami modelowania kinetyki jonowej w płomieniu mieszanki propan/powietrze dla różnych koncentracji paliwa. Otrzymano dobrą zgodność wyników modelowania z eksperymentem. Zbadano wpływ układu ekstrakcji na wyniki pomiarów, w tym na proces tworzenia klastrów i pojawiania się jonów $H_3O^+ \cdot (H_2O)_n$.

The results confirmed the possibility of generation of a super Gaussian beam (SG) when aspheric mirrors were applied of AS1 type. The fourth order formation of SG beam has been shown by adequate shaping of deformable mirror profile introduced into the cw technological laser CO₂ resonator.

Subsequent analysis showed that formation of SG beam of sixth order requires activation of control segments with voltages beyond the available range in the case of tested DM mirror. In order to continue experiences indispensable are small modifications of its deformation characteristics and at the same time formation of a beam with required level of intensity, i.e. the beam, SG, $n = 6$.

Another problem scrutinized in the topic O3/Z2/T1 was related to the microscopic processes in discharge plasma. In the frame of that topic elaborated has been a monographical literature survey and the results of in-house experiments regarding the active medium of CO₂ lasers and in particular related to modeling of discharge and plasma kinetics processes.

Additionally, carried out were investigations of a combustion front of generated plasma in hydrocarbon flames. Experimental results obtained using the mass spectroscopy technique have been compared with the results of modeling of ion kinetics in a flame of propane/air mixture for different concentrations of fuel. Obtained has been a good consistency between the results of modeling and experimental data. Investigated

Przedyskutowano również zależność składu jonowego płomieni od współczynnika równowagowego mieszaniny paliwowej.

Podjęto badania w celu określenia perspektyw zastosowania sond Langmuira do wyznaczania współczynnika ekwiwalencji (równowagowego) mieszaniny. Zbadano zależność sygnału sondy od zawartości jonów w plazmie. Dla potrzeb tego zagadnienia wykonano również pomiary spektroskopowe składu chemicznego plazmy w zamkniętych komorach spalania.

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

W ramach tego tematu kontynuowano badania laserowej preparacji warstw ochronnych do zastosowań w warunkach ekstremalnych obciążeń, w ramach tematu statutowego oraz współpracy dwustronnej z CENIM/CSIC w Madrycie. Wykonano obliczenia numeryczne oraz pomiary pól temperatur, naprężeń, składu chemicznego, mikrotwardości, odporności na korozję oraz na ścieranie w laserowo napawanych dwuwarstwowych powłokach stelitowych.

Opracowano i opublikowano, w ramach współpracy polsko-bułgarskiej, wyniki badania procesów ablacji ceramiki AlN przy użyciu lasera Nd:YAG.

Przy użyciu sondy Langmuira wykonano pomiary rozkładów temperatury oraz prędkości elektronów i jonów powstających podczas laserowej ablacji ZnO, SiO, oraz SiO₂. Wyniki uzupełnione o dane uzyskane przy użyciu

was the influence of extraction on the results of measurements including the process of cluster formation and appearance of $H_3O^+ \cdot (H_2O)_n$ ions. Discussed also was the relation of ion composition of flames from the equilibrium coefficient of fuel mixture.

Investigations have started in order to determine perspectives of application of Langmuir type probes for determination of equivalence (equilibrium) coefficient of a mixture. Investigated was a relation of the probe signal from the ion contents in plasma. For the sake of that problem carried out were also spectroscopic measurements of plasma chemical composition in closed combustion chambers.

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

In the frame of that topic continued have been investigations of laser preparation of protective layers for applications under conditions of extreme loads in the frame of statute topic as well as bilateral cooperation with CENIM/CSIC in Madrid. Carried out were numerical calculations together with measurements of temperature fields, stresses, chemical composition, microhardness, corrosion resistance and ścieranie in laser coated stellite layers.

Developed and published, in the frame of Polish-Bulgarian cooperation, were the results of ceramics ablation processes AlN using Nd:YAG laser.

Using the Langmuir probe carried

spektrometru TOF-MS (Madryt) opracowano i przygotowano do publikacji.

Podjęto prace mające na celu skompletowanie nowego układu deponowania materiału dla potrzeb preparacji warstw ochronnych (laser dispersing) na powierzchniach elementów konstrukcji.

W części tematu dotyczącej zastosowań technik laserowych w analizie i konserwacji obiektów zabytkowych, uzyskano nowe wyniki doświadczalne we współpracy z zespołami analityków z Kopenhagi (School of Conservation), Madrytu (Institute of Chemical Physics), oraz RCBS (W. Mechaniczny PG) Gdańsk.

Ponadto, podjęto badania doświadczalne na rzecz gospodarki (sektor ochrony dóbr kultury) przy użyciu nowej aparatury skompletowanej w poprzednim roku: przenośnego spektrometru XRF, oraz spektrometru do pomiarów współczynnika odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR: 1000-2500 nm). Przy użyciu spektrometru NIR badano stopień degradacji materiałów organicznych, np. stan zachowania zabytkowych papierów, oraz zidentyfikowano zanieczyszczenia organiczne i mikrobiologiczne (grzyby) na powierzchni papieru. Przy użyciu technik dostępnych w IMP PAN oraz w laboratoriach współpracujących, wykonano m.in.:

- badania analityczne polichromii figury sakralnej z XIV w.,
- badania XV w. malarstwa ściennego w Ratuszu Głównego Miasta w Gdańsku,

out were measurements of temperature distributions as well as electron and ion velocities formed during laser ablation of ZnO, SiO, and SiO₂. The results, supplemented for a data obtained using the TOF-MS spectrometer (Madrid), were elaborated and prepared for publication.

The works have commenced aimed at completion of a new system of material deposition for the needs of preparation of protective layers (laser dispersing) on the elements of structural components.

In the part of a topic regarding application of laser techniques in analysis and conservation of monumental objects obtained have been new experimental results in cooperation with groups of analysts from Copenhagen (School of Conservation), Madrid (Institute of Chemical Physics), RCBS (Faculty of Mechanical Engineering, Gdansk University of Technology) Gdańsk.

Additionally, experimental investigations have started referenced to economy (a sector of heritage protection) using a new equipment completed last year: a mobile spectrometer XRF, and spectrometer for measurements of reflection coefficients in the range of near infrared (NIR: 1000 – 2500 nm). Using the NIR spectrometer investigated was the degree of degradation of organic materials for example the state of preservation of monumental papers as well as identified were organic and microbiological (fungus) contaminations on the paper surface. Using the available at

- pomiary składu chemicznego pigmentów mozaiki w Muzeum Zamkowym w Malborku,
- analizę warstw malarskich zabytków malarstwa olejnego w Muzeum Narodowym w Krakowie i Muzeum Śląskim w Katowicach.

Możliwości analityczne nowej aparatury udostępnionej przez IMP PAN są przedmiotem znacznego zainteresowania środowiska konserwatorów i muzealników.

Udostępniono dla współpracujących konserwatorów internetową bazę danych spektralnych <http://www.imp.gda.pl/konserwacja/analizy/>, zawierającą wyniki analiz i dane porównawcze.

Zagadnienie wpływu laserowego oczyszczania powierzchni obiektów zabytkowych z piaskowca gotlandzkiego, było przedmiotem badań analitycznych z użyciem technik XEDS oraz kolorymetrycznej. Badania potwierdziły występowanie zażółcenia powierzchni w granicach błędu pomiarowego, niezależnie od rodzaju oraz prędkości przepływu gazu osłonowego (powietrze, azot techniczny) stosowanego podczas oczyszczania. Analiza XEDS próbek naświetlanych laserem wykazała poza pierwiastkami naturalnie występującymi w piaskowcu gotlandzkim, również obecność siarki, chloru, cynku i tytanu, pochodzących z zanieczyszczeń powierzchni. Stwierdzono migrację zanieczyszczeń powierzchniowych oraz produkty ich reakcji w wyniku długotrwałego

IFFM PAS techniques as well as in cooperating laboratories the following activities have been accomplished:

- *Analytical investigations of polychrome of the sacral figure from XIV century.*
- *Investigations of XV century in wall paintings in the Gdańsk Town Hall.*
- *Measurements of chemical composition of mosaic pigments in the Caste Museum in Malbork.*
- *Analysis of painting layers of oil painting heritage in National Museum in Cracow and Silesian Museum in Katowice.*

Analytical possibilities of a new apparatus made available by IMP PAN are a subject of a significant interest amongst the society of conservators and museum staff.

An access has been made to cooperating conservators to internet spectral data base <http://www.imp.gda.pl/konserwacja/analizy/>, containing results of analyses and comparative data.

The problem of the influence of laser purification of surfaces of monumental objects from Gothland sandstone was a topic of analytical investigations using the XEDS and colorimetric techniques. Investigations confirmed the existence of surface yellowish zones in the range of measurement error, independently from the kind and velocity of cover gas flow (air, technical nitrogen) used during purification. XEDS analysis of samples

oddziaływania zanieczyszczeń atmosferycznych.

O3/Z3/T1. Zastosowania techniki laserowej

Jednym z zadań realizowanych w ramach tego tematu było zastosowanie techniki laserowej do wizualizacji przepływów. Dotyczyło ono 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). Dzięki uzyskanym wynikom opracowano model numeryczny przepływu elektrohydrodynamicznego w modelu elektrofiltru typu drut-płyta. Określono również wpływ szeregu parametrów związanych z budową i pracą elektrofiltru na skuteczność odpylania. Uzyskane rezultaty są przydatne do oceny skuteczności pracy elektrofiltrów, w tym do oceny usuwania submikronowych cząstek pyłu. Jest to aktualny temat badawczy dziedzinie elektrofiltrów. Wykonano również pionierskie w skali światowej pomiary pól prędkości przepływu metodą 2D PIV oraz wizualizację przepływu w reaktorze wyładowania koronowego w wodzie.

Badania dotyczące elektrofiltrów wykonano we współpracy z następującymi ośrodkami zagranicznymi: Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita,

irradiated by laser showed that apart from naturally present radicals in the gothland sandstone there is also sulphur, chlorine, zinc, titanium coming from the surface contaminants. Migration of surface contaminants has been concluded and the products of their reaction due to long term interaction with atmospheric contaminants.

O3/Z3/T1. Applications of laser technology

One of the topics realised in the frame of that topic was application of laser technology in flow visualization. That regarded application of impulse CuBr and Nd:YAG lasers for visualization of gas flows and measurements of velocity fields by means of Particle Image Velocimetry (PIV) method. In the frame of that topic carried out were visualizations and investigations of velocity field distributions in models of electrofilters with account of three velocity components (3D PIV). Thanks to obtained results developed has been a numerical model of electrohydrodynamical flow in a model of electrofilter of a system wire-plate. Determined also was influence of a series of parameters related to construction and operation of electrofilters on the efficiency of dedusting. Obtained results are useful in assessment of efficiency of electrofilter operation including the evaluation of removal of submicron dust particles. This is an actual research topic in the area of electrofilters. Carried out were also pioneering in a world scale measurements of velocity

Japonia, Prof. T. Ohkubo i McMaster University, Department of Engineering Physics, Faculty of Engineering, Hamilton, Ontario, Kanada, Prof. J.-S. Chang.

Drugim zadaniem w temacie O3/Z3/T1 było zastosowanie techniki laserowej do mikroobróbki materiałów. Zadanie to dotyczyło bezpośredniego naświetlania laserowego za pomocą lasera diodowego UV 375 nm w zastosowaniu do produkcji płytek drukowanych o wysokiej gęstości upakowania. Opracowano metodę bezpośredniego naświetlania laserowego umożliwiającą wykonywanie ścieżek o minimalnej gęstości upakowania na poziomie 50/50 μm . W porównaniu z technologią konwencjonalną wykonywania tak gęsto upakowanych ścieżek na PCB technika laserowa wypada o wiele lepiej. Biorąc pod uwagę, iż fotopolimer stosowany w badaniach posiadał rozdzielczość na poziomie 50 μm otrzymane wyniki sugerują, że przy zastosowaniu fotopolimeru laserowego o rozdzielczości na poziomie 25 μm i zmniejszeniu plamki laserowej do tych rozmiarów możliwe będzie wykonywanie ścieżek na najnowszej technologii super-fine-line 25/25 μm .

Badania były częściowo finansowane przez projekt badawczy MNIł PB 1381/T11/2004/27: „Opracowanie metody bezpośredniego naświetlania laserowego do produkcji płytek drukowanych o wysokiej gęstości upakowania” (kierownik prof. J. Mizeraczyk).

W ramach kontraktu z Air Liquide,

fields using 2D PIV method and visualisation of flow in a reactor of corona discharge in water.

Investigations regarding electrofilters were carried out in cooperation with the following foreign research centres: 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 second problem in topic O3/Z3/T1 was application of laser technology for material microprocessing. That problem was regarding a direct laser irradiation by means of diode laser UV 375 nm in application to production of printed circuits of high packing density. Developed method of direct laser irradiation enabling production of paths with minimum density of packing at the level of 50/50 μm . In comparison to conventional technology the production of such densely packed paths on PCB the laser technology proves to be much better. Considering the fact that the photopolymer used in investigations had a resolution at the level of 50 μm the obtained results suggest that in application of laser photopolymer with resolution at the level of 25 μm and reduction of the laser spot to these dimensions will enable production of paths in the most new super-fine-line technology 25/25 μm .

Investigations were partially financed by the research Project MNIł PB

Francja, wykonano wspólnie z zespołem badawczym dr M. Jasińskiego pomiary pól prędkości przepływu w reaktorze plazmy mikrofalowej ze skruberm wodnym.

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. W ostatnich latach zakres badań poszerzono o zastosowanie plazmy wyładowań elektrycznych do oczyszczania wody z zanieczyszczeń organicznych.

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

- eliminację tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze plazmy nietermicznej z katalizatorem (reaktor ze stałonapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym),
- eliminację fenolu w wodzie za pomocą stałonapięciowego wyładowania koronowego,
- zastosowanie techniki spektroskopii indukowanej laserem (Laser Induced Spectroscopy) do pomiarów czasowo-przestrzennych rozkładów cząstek aktywnych w

1381/T11/2004/27: “Development of a method of direct laser irradiation for production of printed circuits with high packing density” (Professor J. Mizeraczyk).

In the frame of a contract with Air Liquide, France, carried out were measurements, in combination with the research group LED by Dr. M. Jasiński, of flow velocity fields in microwave plasma reactor with a water scrubber.

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

A long term objective of investigations carried out in the Department of Applications of Plasma and Laser Technology is development of new, effective and pro-ecological plasma methods of purification of different types of flue gases from harmful gaseous components. In recent years the scope of investigations has been extended for application of electric discharge plasma for purification of water from organic contaminations.

The topics of this year activities related to application of plasma technique for purification of flue gases encompassed:

- *Elimination of nitrogen oxides from flue gas simulators in non-thermal plasma reactor with catalyser (a constant voltage reactor with positive corona discharge).*
- *Elimination of phenol in water by*

plazmie nietermicznej stosowanej do dekompozycji tlenków azotu.

- zastosowania plazmy wyładowania mikrofalowego typu „pochodnia” do destrukcji lotnych związków organicznych oraz do reformingu metanu.
- diagnostykę plazmy mikrofalowej.

Badania eliminacji tlenków azotu z symulatorów gazów odlotowych w reaktorze ze stałonapięciowym dodatnim wyładowaniem koronowym zaowocowały wyjaśnieniem roli reakcji powierzchniowych w procesie usuwania tlenków azotu w obecności katalizatora.

Badania eliminacji fenolu w wodzie za pomocą stałonapięciowego i impulsowego wyładowania koronowego w wodzie i do jej powierzchni pozwoliły określić wpływ takich właściwości wody jak przewodność i odczyn oraz zawartość jonów żelaza na skuteczność destrukcji fenolu. Uzyskane rezultaty wskazują, że wzrost przewodności i pH wody zmniejsza skuteczność eliminacji fenolu, natomiast obecność jonów żelaza zwiększa tę skuteczność.

Badania były częściowo finansowane przez projekt badawczy MNIł PB 1280/T10/2004/27 pn. „Zastosowanie wyładowań elektrycznych do oczyszczania wody z zanieczyszczeń organicznych” (kierownik: dr inż. M. Dors).

W ramach współpracy z Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japonia, Prof. T. Ohkubo, kontynuowane były prace

means of constant voltage corona discharge,

- *Application of Laser Induced Spectroscopy technique in time and space measurements of active particles in non-thermal plasma used for decomposition of nitrogen oxides,*
- *Application of microwave discharge plasma of "torch" type for destruction of volatile organic compounds and methane reforming,*
- *Diagnostics of microwave plasma.*

Investigations of nitrogen oxide elimination from simulators of flue gases in a reactor featuring constant voltage positive corona discharge borne fruits in explanation of a role of surface reactions in a process of removal of nitrogen oxides in the presence of catalyser.

Investigations of phenol elimination in water by means of constant voltage and impulse corona discharge in water and for its surface enabled determination of the influence of such water properties as conductivity and pH as well as the contents of iron ions on the effectiveness of phenol destruction. Obtained results indicate that the increase of conductivity and water pH reduces effectiveness of phenol elimination, on the other hand the presence of iron ions increases the effectiveness.

Investigations were partially financed by the research project MNIł PB 1280/T10/2004/27 titled “Application of electrical discharges for purification

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 2006 głównym rezultatem badań dotyczących zastosowania techniki spektroskopowej indukowanej laserem był przestrzenny pomiar stopnia produkcji rodników OH powodujących eliminację NO w reaktorze wyładowania koronowego typu dysze-płyta.

Badania reformingu metanu oraz destrukcji lotnych związków organicznych za pomocą impulsowego wyładowania mikrofalowego typu "pochodnia" były wykonywane wspólnie z zespołem badawczym Zakładu Elektrodynamiki Gazów Zjonizowanych O3/Z-1, kierowanym przez dr inż. M. Jasińskiego. Głównym ich wynikiem jest opracowanie metody produkcji wodoru poprzez reforming metanu za pomocą plazmy mikrofalowej pod ciśnieniem atmosferycznym. Metoda będzie dalej rozwijana w ramach projektu badawczego MNiSW, którego kierownikiem jest dr inż. M. Jasiński, z ukierunkowaniem na uzyskanie większych wydajności i z zastosowaniem dużych przepływów gazów. Innym ważnym rezultatem jest diagnostyka plazmy mikrofalowej wykonana wspólnie z Zakładem O3/Z1.

Jerzy Mizeraczyk

of water from organic compounds" (Dr. M. Dors).

In the frame of cooperation with Oita University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita, Japan, Professor T. Ohkubo, continued were works on implementation of Laser Induced Spectroscopy technique in time and space measurements of active particles in non-equilibrium plasma used for decomposition of nitrogen oxides. In 2006 the main result of investigations related to application of Laser Induced Spectroscopy technique was a spatial measurement of a rate of OH radicals production rendering elimination of NO in corona discharge reactor of a nozzle-plate type.

Investigations of methane reforming and destruction of volatile organic compounds by means of impulse microwave discharge of "torch" type were carried together with a research group from the Department of Electrodynamics of Ionised gases O3/Z-1, LED by Dr. M. Jasiński. Their main results is development of a method of hydrogen production by methane reforming by means of microwave plasma under atmospheric pressure. The method will be further developed in the frame of MNiSW research project, directed by Dr. M. Jasiński, which will be focused on obtaining greater efficiencies and application of large gas flows. Another important result is microwave plasma diagnostics carried out together with Department O3/Z1.

Translated by Dariusz Mikielwicz