

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

85

WARSZAWA - POZNAŃ 1983

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

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

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

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

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

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

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

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS

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

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1983

Printed in Poland

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

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

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

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JERZY MILEWSKI, MAREK BRUNNÉ, JERZY STAŃCO

Działalność naukowa Zespołu Badawczego Laserów Przepływowych i Gazodynamicznych w latach 1976 - 1980

Исследовательская группа проточных и газодинамических лазеров

Научная деятельность Группы в 1976-1980 г.г. концентрировалась вокруг теоретических и экспериментальных исследований газодинамических лазеров CO_2 , N_2O и CO , а также исследовательских и конструкционных работ направленных на создание проточного лазера большой мощности для технологических целей.

Ряд работ из области газодинамических лазеров проводился в сотрудничестве с Физическим институтом им. П. Н. Лебедева АН СССР в Москве.

Research Group for Electric-Discharge Convection Lasers and Gasdynamic Lasers

The Research Group for Electric-Discharge Convection Lasers and Gasdynamic Lasers concentrated its scientific activity during the years 1976-1980 on theoretical and experimental investigations of CO_2 , N_2O and CO GDL's together with investigations and design work aimed at constructing an electric-discharge convection laser facility for metal-processing purposes.

Part of the work on GDL's was done in cooperation with the Lebedev Physical Institute in Moscow.

1. Wprowadzenie

W niniejszym opracowaniu omawia się łącznie działalność naukową Pracowni Radiacyjnej Dynamiki Gazów Zakładu 7 i, stanowiącą jej kontynuację, działalność Zespołu Badawczego Laserów Przepływowych i Gazodynamicznych (LPG), utworzonego z początkiem roku 1980. Problematyka prac prowadzonych w latach 1976 - 1980 obejmowała:

- eksperymentalne i teoretyczne badania laserów gazodynamicznych CO_2 , N_2O , CO w ramach problemu MR I.23 (temat 5.4.B) „Mechanika cieczy i gazów”, koordynowanego przez IPPT PAN,

- prace badawcze i konstrukcyjne mające na celu realizację lasera przepływowego do celów technologicznych, o mocy promieniowania w wiązce równej 10 kW, prowadzone w ramach problemu węzłowego 05.10 „Rozwój taboru pływającego oraz systemów okrę-

towych” na zlecenie Centrum Techniki Wytwarzania Przemysłu Okrętowego „PROMOR” w Gdańsku.

Badania laserów gazodynamicznych, podjęte w IMP PAN w roku 1969, objęły w latach 1976 - 80 analizę numeryczną laserów $\text{CO}_2\text{-N}_2$, $\text{N}_2\text{O-N}_2$ i CO [1, 5, 6, 8, 10, 13, 14, 17, 20, 26 - 30, 33, 35, 38], eksperymentalne badania porównawcze laserów gazodynamicznych $\text{N}_2\text{O-N}_2$ i $\text{CO}_2\text{-N}_2$ [11, 15, 16, 19, 22, 23], analizę numeryczną rezonatorów laserów gazodynamicznych i przepływowych [3, 7, 21, 24, 25, 32, 34, 42], badania generacji promieniowania o długości fali $18,4\text{ }\mu\text{m}$ w przepływie naddźwiękowym mieszaniny $\text{CO}_2\text{-Ar}$, zarówno teoretyczne [31, 36, 40, 41, 46] jak doświadczalne [43, 44], oraz analizę możliwości generacji w przepływie CO_2 promieniowania o innych długościach fali [45].

Prace nad laserem przepływowym CO_2 dużej mocy do celów technologicznych rozpoczęto w roku 1976 opierając się na dokonanej w uprzednich latach analizie różnych wersji lasera. Celem ich jest realizacja laboratoryjnej wersji lasera CO_2 o mocy 10 kW , za pomocą której można będzie dokonać wstępnych prób cięcia i spawania blach okrętowych; posłuży ona również do przeprowadzenia badań optymalizacyjnych, na podstawie których byłby konstruowany prototyp lasera przeznaczonego do zastosowania w przemyśle. W latach 1976 - 80 prowadzono prace projektowe i wykonawcze związane z realizacją stoiska badawczego (zob. [12]), badania warunków wzbudzania elektrycznego gazu w dużej objętości [39], analizę numeryczną rezonatorów optycznych i badanie możliwości dynamicznego justowania wieloprześciowego rezonatora lasera.

2. Badania laserów gazodynamicznych

Badania laserów gazodynamicznych prowadzono zajmując się trzema różnymi zagadnieniami:

- analizą teoretyczną laserów gazodynamicznych CO_2 , N_2O i CO ,
- opracowaniem teorii aktywnych wnęk rezonansowych laserów gazodynamicznych,
- badaniami eksperymentalnymi laserów gazodynamicznych CO_2 i N_2O .

W obrębie pierwszego zagadnienia prowadzono obliczenia teoretyczne dotyczące kwestii powstawania wzmocnienia i inwersji obsadzeń w trakcie naddźwiękowej ekspansji mieszanin gazów molekularnych i atomowych, ukierunkowane na zagadnienie uzyskania warunków brzegowych dla równań opisujących problem ekstrakcji mocy z aktywnych rezonatorów laserów gazodynamicznych CO_2 ($10,6\text{ }\mu\text{m}$), CO_2 ($18,4\text{ }\mu\text{m}$), CO_2 ($16\text{ }\mu\text{m}$), N_2O ($10,8\text{ }\mu\text{m}$) i CO ($\sim 6\text{ }\mu\text{m}$). Rezultaty prac przedstawiono w następujących pozycjach spisu publikacji: 1, 2, 4 - 6, 9, 10, 13, 14, 17, 27, 28, 30, 31, 33, 36 - 38, 40, 41, 45, 46. Zasadniczy wkład w teorię laserów gazodynamicznych stanowi:

- a) opracowanie teorii laserów gazodynamicznych $\text{N}_2\text{O/N}_2$ /dodatki,
- b) opracowanie teorii laserów gazodynamicznych CO , $\text{CO/N}_2/\text{Ar}$ i CO/Ar z uwzględnieniem efektów związanych z przejściami dwukwantowymi,
- c) zaproponowanie modelu i opracowanie teorii laserów gazodynamicznych CO_2/Ar pracujących na długości fali $\lambda=18,4\text{ }\mu\text{m}$,

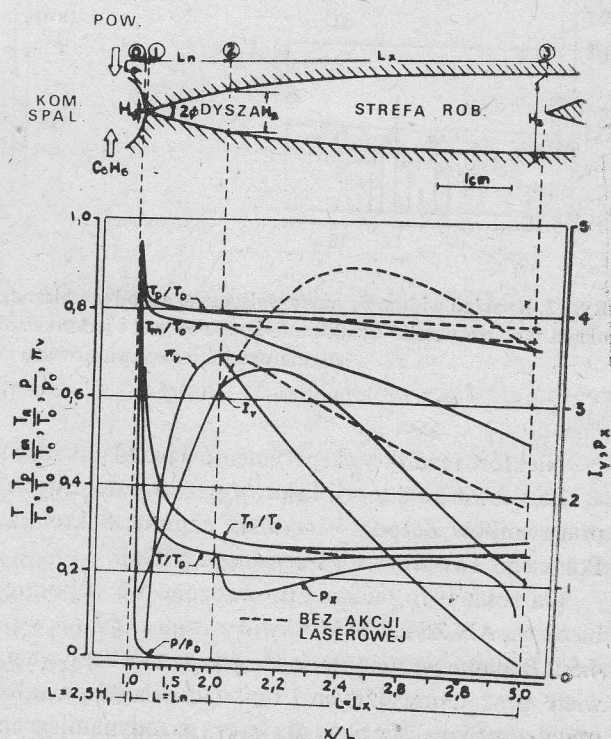
d) zaproponowanie modelu teoretycznego laserów gazodynamicznych CO_2 pracujących na długości fali $\lambda \approx 16 \mu\text{m}$ (długość fali potrzebna w procesie separacji izotopów uranu).

Przykłady rezultatów tych obliczeń przedstawiono na rys. 1 i 2.

W obrębie drugiego zagadnienia prowadzono badania teoretyczne aktywnych rezonatorów laserów gazodynamicznych w ujęciu kinetycznej (korpuskularnej) [8, 20, 26, 29, 35] i falowej [3, 7, 21, 24, 25, 32, 42] teorii promieniowania. Zasadnicze znaczenie naukowe posiada:

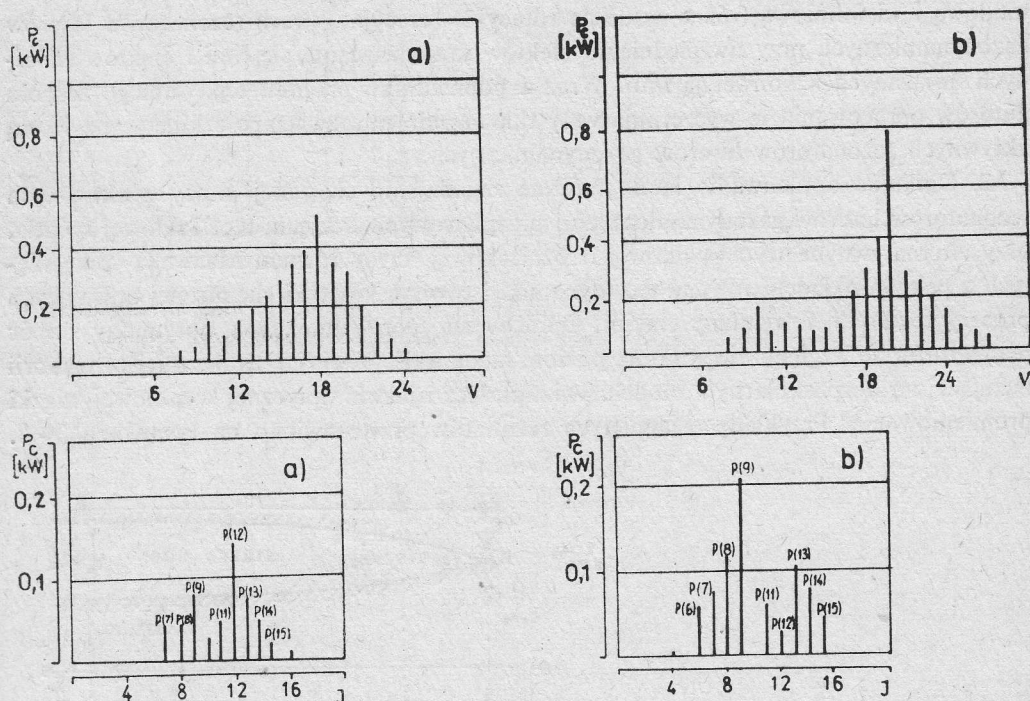
1. Opracowanie w ujęciu teorii korpuskularnej światła zagadnień związanych z wielomodowością i wieloliniowością (różne przejścia rotacyjno-rotacyjne) pracą rezonatorów laserów gazodynamicznych przy uwzględnieniu efektów samonasycania się linii i efektów skrośnych związanych z konwersją linii. Wraz z poprzednimi pracami tego samego zespołu autorów opracowania te wyczerpują wszystkie zagadnienia związane z kinetyczną teorią aktywnych rezonatorów laserów gazodynamicznych.

2. Unikalne opracowanie monograficzne zagadnienia ekstrakcji mocy z aktywnych rezonatorów laserów gazodynamicznych i przepływowych w ujęciu teorii falowej światła, przy alternatywnym użyciu całkowitej i różniczkowej formy równań Maxwella sprzęgniętych z pełnym układem równań gazodynamiki i równań kinetyki chemicznej opisujących procesy relaksacji i wymiany energii. Opracowana teoria umożliwia optymalny dobór rezonatorów ze względu nie tylko na poziom mocy wyjściowej (jak to ma miejsce w teorii bazującej na korpuskularnym modelu światła), lecz i jakość optycznej wyjściowej wiązki promieniowania. Przykłady osiągniętych rezultatów przedstawiono na rysunkach 3 - 8.



Rys. 1. Rozkład parametrów w kanale gazodynamicznego lasera CO_2 pracującego na produktach spalania benzenu (wg [1])

W obrębie ostatniego zagadnienia przeprowadzono cykl porównawczych badań wzbudzonych termicznie i pompowanych selektywnie (przy użyciu N_2 lub powietrza jako ośrodka pompującego) mieszaninowych laserów gazodynamicznych CO_2 i N_2O [9, 11, 15, 16, 19, 22, 23] oraz zweryfikowano eksperymentalnie własną koncepcję teoretyczną gazodynamicznego lasera CO_2 pracującego na długości fali $18,4 \mu m$ [43, 44]. Zarówno pierwszy jak i drugi cykl prac eksperymentalnych jest całkowicie oryginalnym wkładem zespołu autorów w badania laserów gazodynamicznych.

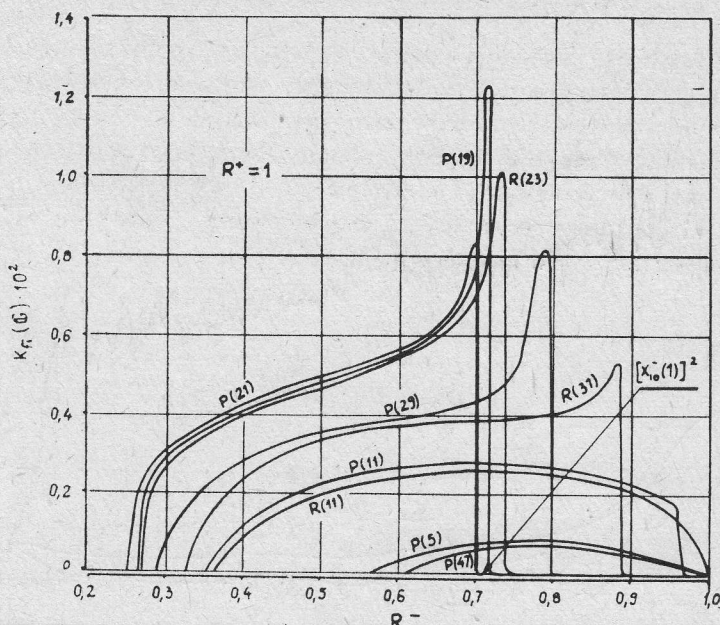


Rys. 2. Rozkład widmowy mocy wyjściowej gazodynamicznego lasera CO_2 dla przypadków: a) uwzględnienia wpływu przejść dwukwantowych $v \leftrightarrow v \pm 2$ i jednokwantowych $v \leftrightarrow v \pm 1$, b) uwzględnienia wpływu jedynie przejść jednokwantowych $v \leftrightarrow v \pm 1$ (wg [10])

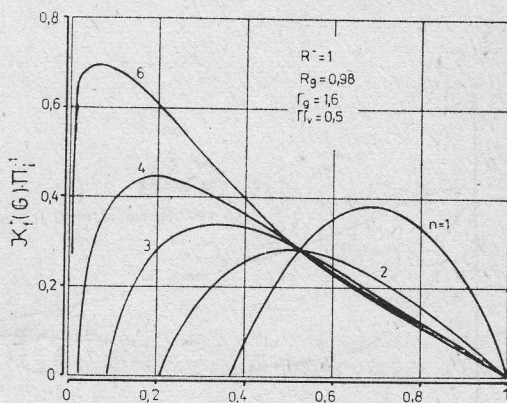
Niektóre rezultaty eksperymentów przedstawione na rysunkach 9 - 13.

Za rozwinięcie teorii laserów gazodynamicznych i badania nad laserem N_2O/N_2 grupa pracowników Zespołu otrzymała nagrodę Sekretarza Naukowego PAN (1977) i nagrodę Polskiego Towarzystwa Fizycznego (1976).

Od roku 1976 badania prowadzono we współpracy z Instytutem Fizyki im. P. N. Lebediewa AN ZSRR w Moskwie w ramach planu współpracy PAN — AN ZSRR w temacie 4.5 „Badania systemów laserowych z przepływem gazu”. Rezultatem współpracy jest wiele prac teoretycznych i doświadczalnych, a także wspólny wniosek patentowy dotyczący ośrodka aktywnego dla lasera gazodynamicznego [47].



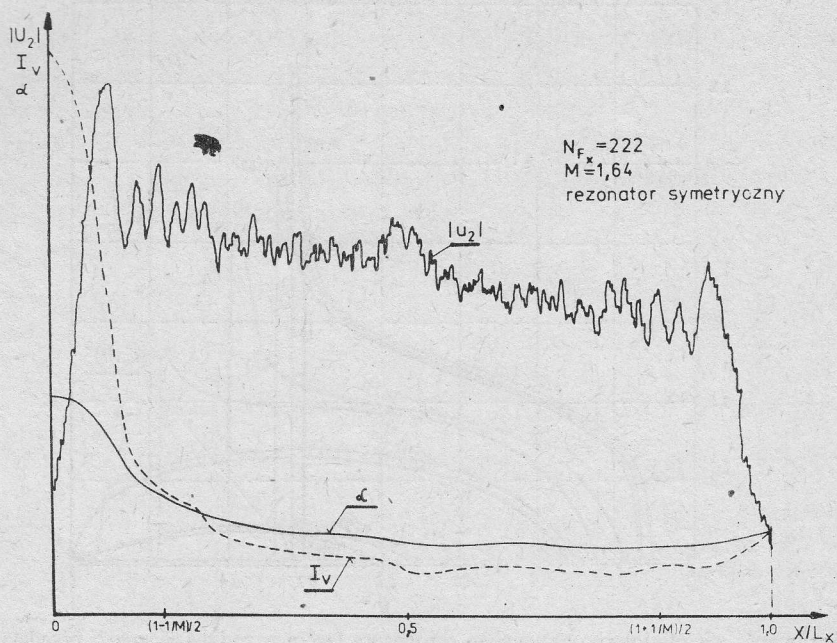
Rys. 3. Sprawność wieloliniowego aktywnego rezonatora lasera gazodynamicznego przedstawiona dla poszczególnych linii w funkcji stałej odbicia zwierciadła transmitującego (wg [8])



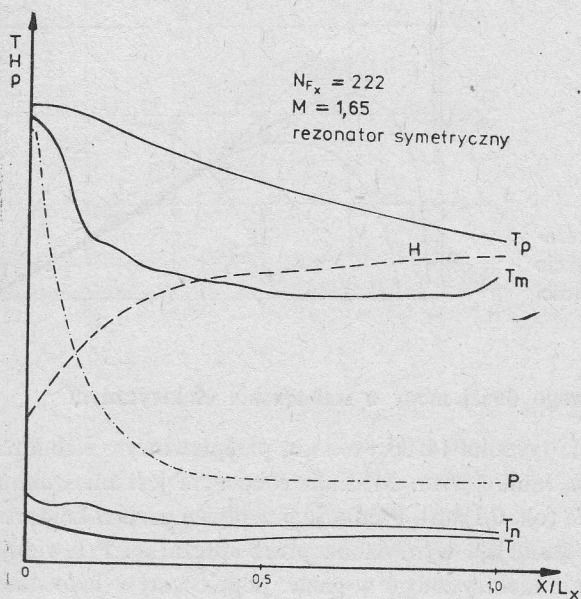
Rys. 4. Sprawność wieloprześciowego rezonatora lasera gazodynamicznego jako funkcja stałej odbicia zwierciadła transmitującego i ilości przejść (n) (wg [20])

3. Realizacja lasera przepływowego dużej mocy o wzbudzeniu elektrycznym

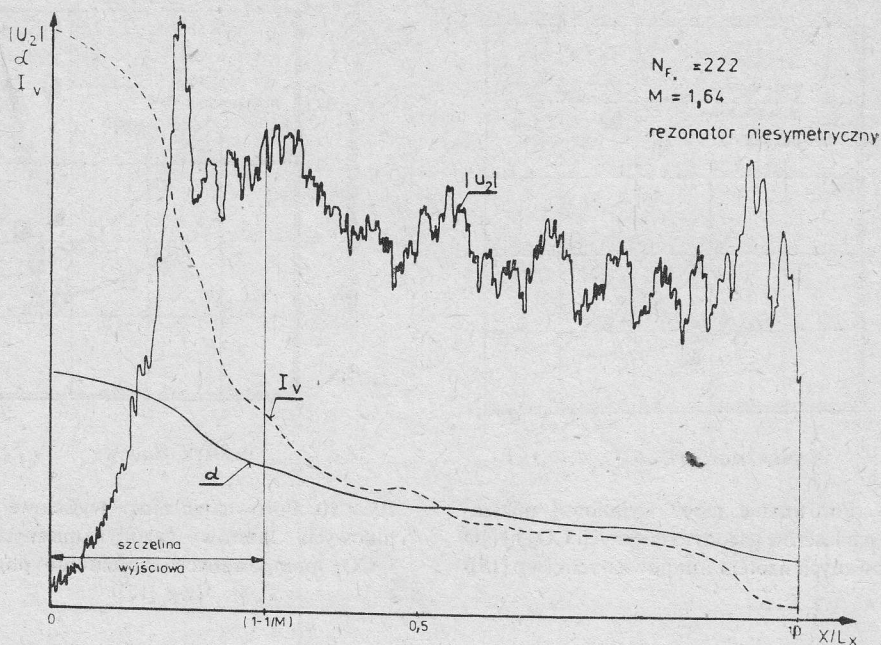
Schemat lasera jest przedstawiony na rysunku 14. Jest to laser przepływowy o wzbudzeniu elektrycznym, pracujący w obiegu zamkniętym. Medium roboczym jest mieszanina CO_2 , N_2 i He o ciśnieniu rzędu 100 hPa (ok. 0,1 ata). Prędkość przepływu gazu w komorze roboczej wynosi 100 m/s. Cyrkulacja gazu jest wymuszona przez sprężarkę. Przewiduje się dwa warianty realizacji wyładowania elektrycznego w gazie: poprzeczne wyładowanie prądu stałego oraz podłużne wyładowanie prądu stałego stabilizowane polem elektromagnetycznym wielkiej częstotliwości.



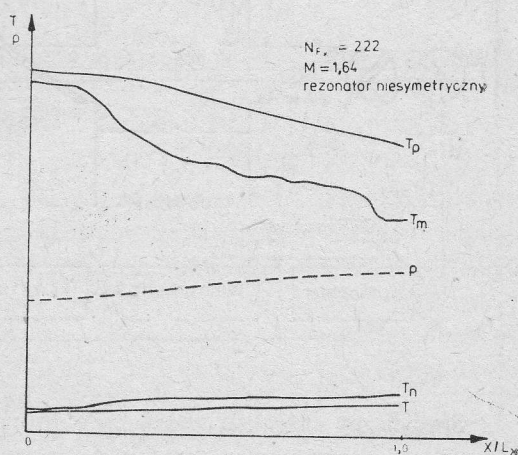
Rys. 5. Rozkłady pola $|U_2|$, wzmocnienia α i inwersji obsadzeń I_v w wariancie $H = \text{const}$ (wg [42]) z rezonatorem symetrycznym



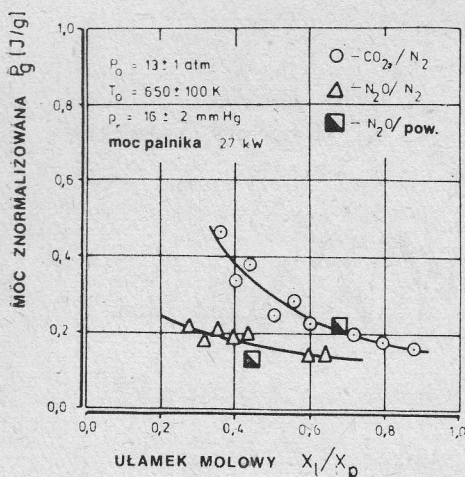
Rys. 6. Rozkład parametrów gazodynamicznych w wariancie $p = \text{const}$ (wg [42])



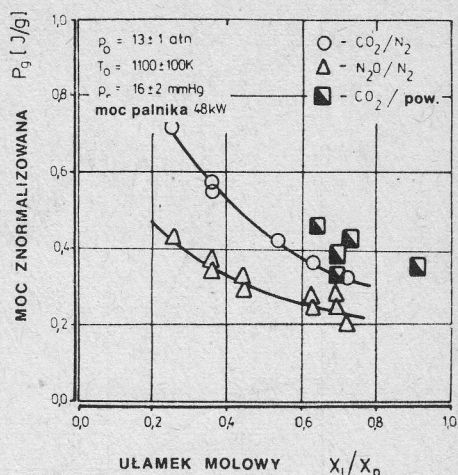
Rys. 7. Rozkład pola $|U_2|$, wzmocnienia α i inwersji obsadzeń I_v dla wariantu $H=\text{const}$ (wg [42]) z rezonatorem niesymetrycznym



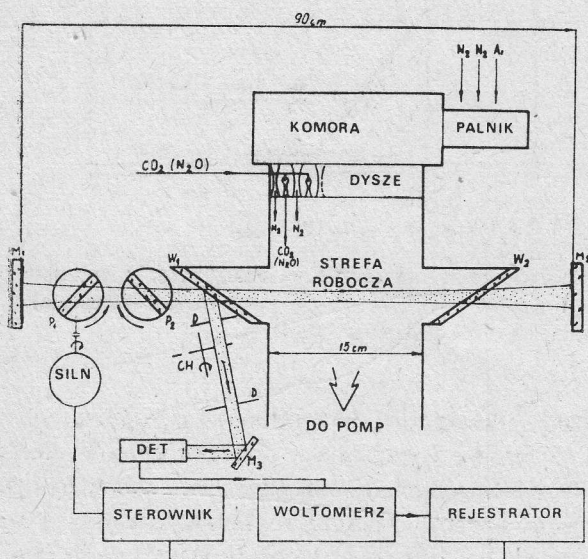
Rys. 8. Rozkład parametrów gazodynamicznych dla wariantu $H=\text{const}$ z rezonatorem niesymetrycznym (wg [42])



Rys. 9. Porównanie mocy wyjściowej mieszaninowych laserów gazodynamicznych CO_2 i N_2O pompowanych azotem lub powietrzem (wg [15])

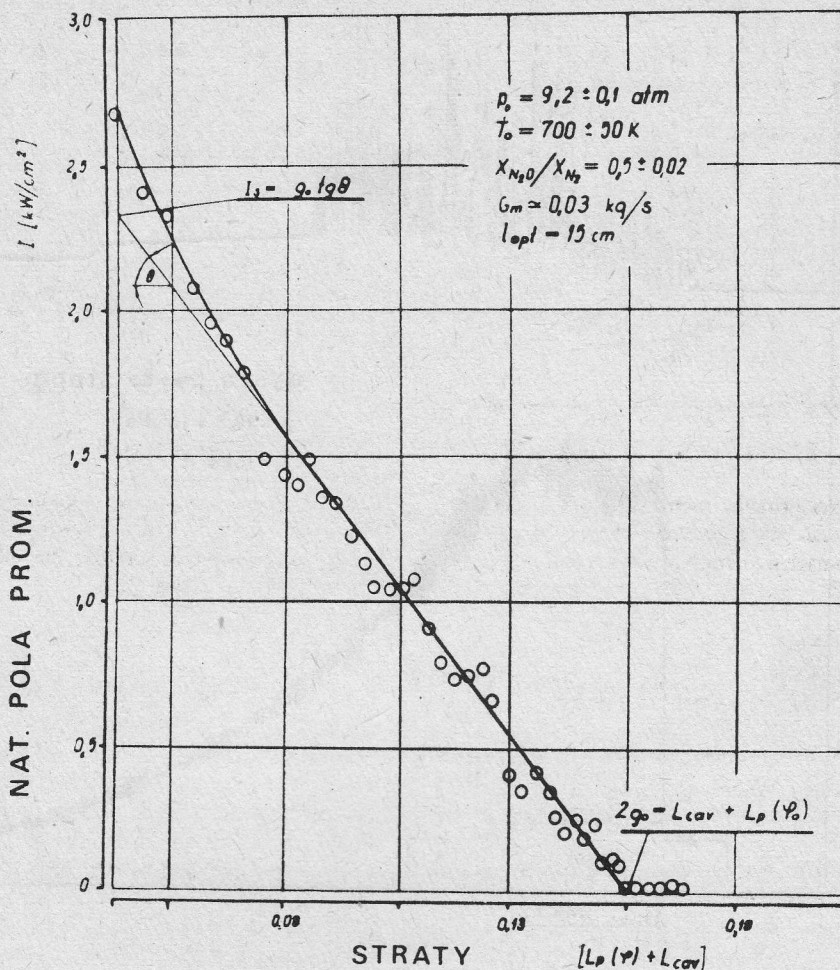


Rys. 10. Porównanie mocy wyjściowej mieszaninowych laserów gazodynamicznych N_2O i CO_2 pompowanych azotem lub powietrzem (wg [15])



Rys. 11. Schemat układu do pomiarów parametru nasycenia i wzmacnienia dla słabych sygnałów w laserze gazodynamicznym CO_2 (N_2O) o pracy ciągłej z mieszaniną strug (wg [22])

Specyficzny charakter zadań związanych z realizacją lasera spowodował przesunięcie punktu ciężkości w tym temacie na zagadnienia konstrukcyjne i wykonawcze. Projekt części mechanicznej wykonano w Zakładzie Doświadczalnym IMP PAN „ZAMPAN” na podstawie założeń konstrukcyjno-badawczych dostarczonych przez Pracownię RDG

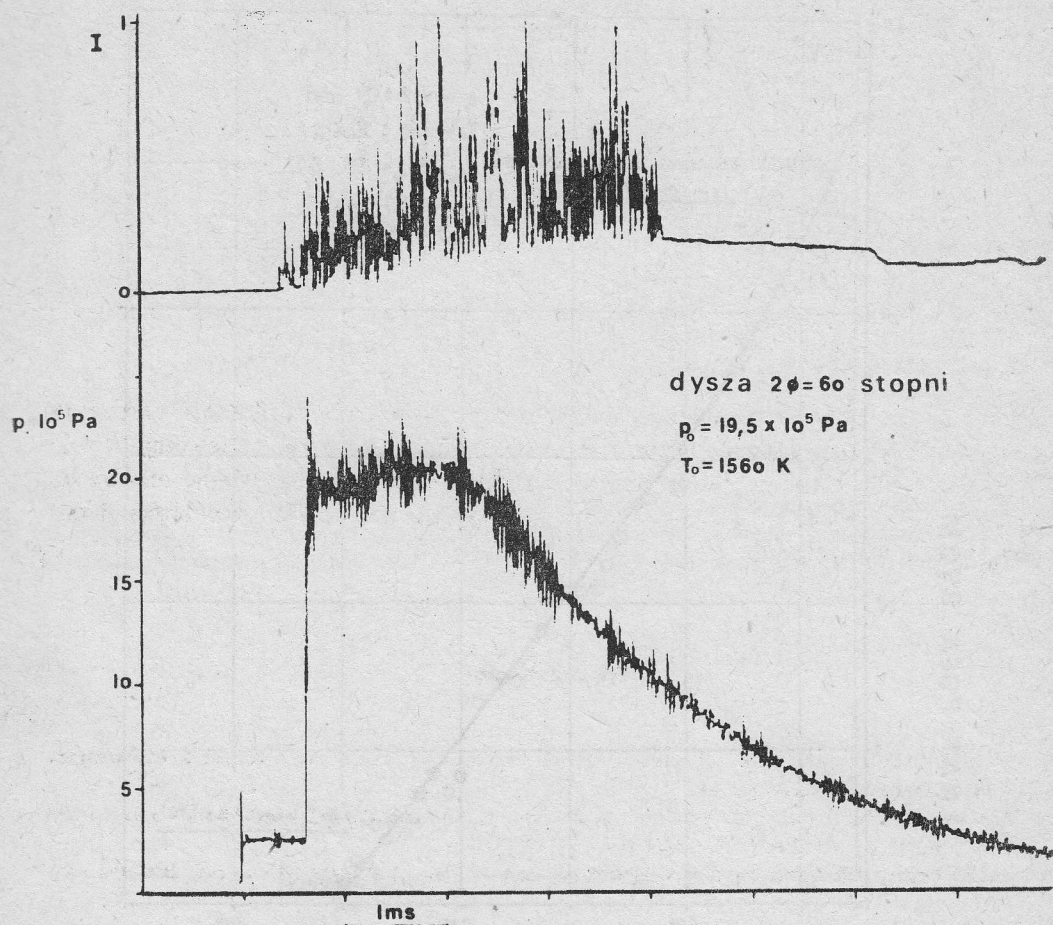


Rys. 12. Natężenie pola promieniowania w rezonatorze optycznym w funkcji strat w rezonatorze dla lasera gazodynamicznego N_2O/N_2 o pracy ciągłej z mieszaniem strug (pomiar wzmocnienia słabego sygnału i parametru nasycenia) (wg [22])

[12]. Wykonanie elementów konstrukcji mechanicznej powierzono wyspecjalizowanym zakładom, w tym Stoczni Gdańskiej. Sprężarkę wymuszającą przepływ gazu w obiegu zamkniętym, zaprojektowaną w Pracowni RDG, wykonała WSK Rzeszów. Zakłady BELOS w Bielsku-Białej zaprojektowały w myśl otrzymanych założeń i wykonały zasilacz wysokiego napięcia (30 kV, 250 kW). W projekcie lasera przewidziano automatyzację zbierania danych pomiarowych opartą na systemie CAMAC. Odpowiednio do tego został skompletowany zestaw bloków tego systemu.

Badania prowadzone w omawianym temacie dotyczyły głównie dwu zagadnień:

— realizacji akcji laserowej w rezonatorze optycznym pokrywającym możliwie najlepiej całą objętość strefy roboczej, w której istnieje inwersja obsadzeń wibracyjno-rotacyjnych poziomów energetycznych molekuł CO_2 , oraz

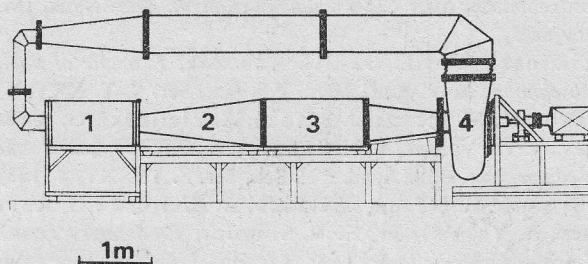


Rys. 13. Impuls generacji i ciśnienia w impulsowym laserze gazodynamicznym $18,4 \mu\text{m}$ (wg [44])

— uzyskiwania jednorodnego wyładowania elektrycznego w dużej objętości przepływającego gazu.

Rozwinięcie numerycznych metod rozwiązania problemu ekstrakcji mocy z aktywnych rezonatorów laserów przepływowych i gazodynamicznych (zob. rozdz. 2) pozwoliło na określenie parametrów i zaprojektowanie wieloprześciowego rezonatora niestabilnego dla lasera. Opracowanie metody dynamicznego justowania takiego rezonatora jest przedmiotem odrębnych badań.

Warunki realizacji stabilnego wyładowania jarzeniowego w gazie (mieszanina CO_2 , N_2 i He) o średnim ciśnieniu badano w układzie: stałoprądowe wyładowanie wzdłużne i poprzeczne do niego bezelektrodowe wyładowanie wielkiej częstotliwości (6 MHz). W kanale o szerokości 0,2 m uzyskano wstępnie [39], między jednoczęściowymi elektrodami, optycznie jednorodne wyładowanie w przepływie gazu o ciśnieniu 20 - 40 Tr i prędkości ok. 5 m/s.



Rys. 14. Schematyczny rysunek lasera przepływowego dużej mocy o wzbudzeniu elektrycznym

1 – strefa robocza, 2 – dyfuzor, 3 – chłodnica, 4 – sprężarka

Prace nad laserem są prowadzone od 1976 roku wspólnie z Instytutem Elektroniki Kwantowej WAT na podstawie porozumienia o współpracy naukowo-badawczej. W roku 1979 zawarto porozumienie o współpracy ze Stoczną Gdańską. Przewiduje ono m. in., docelowo, zastosowanie urządzenia laserowego w skali technicznej do prefabrykacji kadłubów statków w tej stoczni.

Wykaz publikacji

- [1] M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, A. Zieliński, *Analysis of a Combustion-Driven Gasdynamic Laser*, AIAA Journ., **14**, 3 (1976) 352.
- [2] J. Stańco, J. Milewski, M. Brunné, A. Zieliński, *Koncepcja lasera magnetogazodynamicznego CO₂*. Biuletyn IMP PAN, nr 181/830/76.
- [3] G. Rabczuk, *Podstawy analizy rezonatorów laserowych w ujęciu teorii falowej*. Biuletyn IMP PAN, nr 165/680/76.
- [4] M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, A. Zieliński, *Koncepcja lasera przepływowego z pompą magnetogazodynamiczną*. VII Konf. EKON-76, Poznań 1976, A-18/43.
- [5] A. Zieliński, M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, *Wzmocnienie i inwersja obsadzeń w dyszy ekspansyjnej gazodynamicznego lasera CO*. VII Konf. EKON-76, Poznań 1976, A-86/124.
- [6] M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, A. Zieliński, *Analiza numeryczna wzbudzonego termicznie gazodynamicznego lasera N₂O*. VII Konf. EKON-76, Poznań 1976, A-87/125.
- [7] G. Rabczuk, J. Milewski, *Próba rozwiązania rezonatora lasera gazodynamicznego*. VII Konf. EKON-76. Poznań 1976, A-88.
- [8] M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, A. Zieliński, *Approximate theory of power extraction from a multiline cw gasdynamic laser cavity*. J. Appl. Phys., **47**, 4 (1976) 1385.
- [9] J. Milewski, M. Brunné, J. Stańco, A. Zieliński, G. Rabczuk, M. Irczuk, *Badania lasera gazodynamicznego przeprowadzone w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN*. Biuletyn IMP PAN, nr 158/850/76.
- [10] A. Zieliński, M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, *Gain and population inversion in a carbon monoxide cw gasdynamic laser*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. S. T. XXIV, 6 (1976) 31.
- [11] J. Milewski, M. Brunné, M. Irczuk, J. Stańco, A. Zieliński, G. Rabczuk, A. I. Demin, A. Yu. Volkov, E. M. Kudriavtsev, N. N. Sobolev, *Experiment with a cw N₂O gasdynamic laser and its qualitative comparison with a CO₂ laser*. Appl. Phys. Lett. **30**, 7 (1977) 342.
- [12] M. Brunné, J. Milewski, J. Stańco, A. Zieliński, G. Rabczuk, *Laser przepływowy CO₂-N₂ o mocy 10 kW wzбудzany elektrycznie w obiegu zamkniętym – założenia konstrukcyjno-badawcze*, Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 6/863/77.

- [13] A. Zieliński, *Gazodynamiczny laser CO o działaniu ciągłym*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 20/889/77 (rozprawa habilitacyjna).
- [14] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, G. Rabczuk, *Example of numerical analysis of the $N_2O/N_2/H_2O$ cw gasdynamic laser*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. S. T. XXV, 4 (1977).
- [15] J. Milewski, M. Brunné, M. Irczuk, J. Stańco, A. Zieliński, G. Rabczuk, A. I. Demin, A. M. Kudriavtsev, A. Yu. Volkov, N. N. Sobolev, *N_2O/N_2 cw gasdynamic laser versus CO_2/N_2 GDL. A qualitative comparison*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. S. T. XXV, 4 (1977) 29.
- [16] J. Milewski, M. Brunné, M. Irczuk, J. Stańco, A. Zieliński, G. Rabczuk, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, A. Yu. Volkov, N. N. Sobolev, *Preliminary experiments with thermally excited cw N_2O mixing gasdynamic laser*. 3 Int. Tagung „Laser und ihre Anwendungen”, Dresden 1977, K-10/67.
- [17] M. Brunné, J. Milewski, A. Zieliński, G. Rabczuk, *Introductory results of a numerical analysis of cw N_2O/N_2 gasdynamic laser with common expansion*. 3 Int. Tagung „Laser und ihre Anwendungen”, Dresden 1977, K-14.
- [18] M. Brunné, J. Milewski, *Oddziaływanie wiązki laserowej o długości fali $\lambda = 10,6 \mu m$ z materią*. Konf. „Zastosowanie plazmy niskotemperaturowej w przemyśle”, Częstochowa 1977.
- [19] J. Milewski, M. Brunné, J. Stańco, A. Zieliński, M. Irczuk, G. Rabczuk, A. Yu. Volkov, E. M. Kudriavtsev, A. I. Demin, *Low-stagnation-temperature characteristics of cw N_2O and CO_2 gasdynamic mixing lasers pumped by nitrogen or air*. Appl. Phys. Lett., 22, 10 (1978) 642.
- [20] M. Brunné, A. Zieliński, *Simplified theory of the multi-pass cw gasdynamic laser cavity*. J. Appl. Phys., 49, 4 (1978).
- [21] G. Rabczuk, J. Milewski, *Numeryczna metoda rozwiązania problemu dwuwymiarowego rezonatora pasywnego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 25/888/77.
- [22] J. Milewski, M. Brunné, B. Polanowski, J. Stańco, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Saturation parameter and small-signal gain of cw mixing CO_2 and/or N_2O gasdynamic lasers*. Appl. Phys. Lett., 33, 12 (1978) 1007.
- [23] J. Milewski, M. Brunné, J. Stańco, A. Zieliński, M. Irczuk, G. Rabczuk, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, A. Yu. Volkov, N. N. Sobolev, *Experimental investigation of an N_2O/N_2 gasdynamic laser*. VIII Int. Conf. EKON-78, Poznań 1978, A-11/29.
- [24] G. Rabczuk, J. Milewski, *Numerical method of mode selection for two-dimensional laser cavities*. VIII Int. Conf. EKON-78, Poznań 1978, A-7/21.
- [25] G. Rabczuk, J. Milewski, *Numerical design of coaxial unstable resonator*. VIII Int. Conf. EKON-78, Poznań 1978, A-8/23.
- [26] M. Brunné, A. Zieliński, *Rate equation description of a multipass cw gasdynamic laser active cavity*. VIII Int. Conf. EKON-78, Poznań 1978, A-9/25.
- [27] A. Zieliński, *Carbon monoxide/argon cw gasdynamic laser*. VIII Int. Conf. Ekon-78, Poznań 1978, A-10/27.
- [28] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, G. Rabczuk, *Selected results of a numerical analysis of the N_2O/N_2 cw gasdynamic laser*. VIII Int. Conf. EKON-78, Poznań 1978, A-12.
- [29] M. Brunné, A. Zieliński, *Rate equation description of an increased efficiency cavity of cw gasdynamic lasers*. II Int. Symp. on Gas-Flow and Chemical Lasers, Brussels 1978, Mc-Graw-Hill Book Co., 1979.
- [30] A. Zieliński, M. Brunné, *Introduction to numerical analysis of the carbon monoxide cw gasdynamic lasers*. II Int. Symp. on Gas-Flow and Chemical Lasers, Brussels 1978, Mc-Graw-Hill Book Co., 1979.
- [31] M. Brunné, J. Milewski, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Estimation of parameters of a cw $18.4 \mu m$ CO_2/Ar gasdynamic laser*. II Int. Symp. on Gas-Flow and Chemical Lasers, Brussels 1978, Mc-Graw-Hill Book Co., 1979.
- [32] G. Rabczuk, J. Milewski, *Numerical calculation for optical resonators of high-power flow lasers*. II Int. Symp. on Gas-Flow and Chemical Lasers, Brussels 1978, Mc-Graw-Hill Book Co., 1979.
- [33] A. Zieliński, M. Brunné, *Analysis of multi-line gasdynamic lasers and two-quanta transitions in gasdynamic CO lasers*. Proc. Int. Conf. LASERS '79, Orlando (USA) (STS Press, 1980). 562.

- [34] G. Rabczuk, J. Milewski, *Numerical calculations for optical resonators of cw gasdynamic lasers*. Proc. Int. Conf. LASERS'79, Orlando (USA) (STS Press, 1980), 570.
- [35] M. Brunné, A. Zieliński, *Rate equation description of multi-line gasdynamic lasers*. Proc. Int. Conf. LASERS'79, Orlando (USA) (STS Press, 1980), 178.
- [36] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Influence of CO₂ concentration on estimated values of parameters of 18.4 μm CO₂/Ar cw gasdynamic laser*. Proc. Int. Conf. LASERS'79, Orlando (USA) (STS Press, 1980), 554.
- [37] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, A. Vedeneev, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Preliminary calculations for prediction of the nozzle geometry influence on parameters of cw CO₂/Ar 18.4 μm gasdynamic lasers*. IX Int. Conf. EKON-80, Poznań 1980, A-43/121.
- [38] A. Zieliński, M. Brunné, *One-dimensional analysis of a cw gasdynamic laser driven by pure carbon monoxide expansion*. IX Int. Conf. EKON-80, Poznań 1980, A-44/123.
- [39] J. Stańco, J. Milewski, P. Wawrzyńczyk, *Experimental investigations of HF stabilized electric discharge for CO₂ lasers*. IX Int. Conf. EKON-80, Poznań 1980, A-74/196.
- [40] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, A. I. Demin, A. Yu. Volkov, E. M. Kudriavtsev, *Simplified calculations for prediction of parameters of cw CO₂/Ar gasdynamic lasers operating at 18.4 μm wavelength*. J. Appl. Phys. **52**, 1 (1981) 74.
- [41] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Influence of the nozzle geometry and stagnation conditions on parameters of a cw CO₂ gasdynamic laser operating on (03¹0) ⇌ (10⁰0) transition*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. S. T. **38**, 11-12 (1980) 171.
- [42] G. Rabczuk, *Metody obliczeniowe rezonatorów laserów przepływowych*. Rozprawa doktorska, 1980.
- [43] A. A. Vedeneev, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, J. Stańco, J. Milewski, M. Brunné, *Shock-tube CO₂ gasdynamic laser operating on the (03¹0) ⇌ (10⁰0) transition at 18.4 μm*. Appl. Phys. Lett., **38**, 4 (1981) 199.
- [44] A. A. Vedeneev, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, J. Stańco, J. Milewski, M. Brunné, *Shock-tube driven pulsed CO₂/Ar 18.4 μm gasdynamic laser*. Proc. Int. Conf. LASERS'80, New Orleans (USA) (STS Press, 1981) 647.
- [45] M. Brunné, A. Zieliński, A. Cenian, *Comments on applicability of thermal excitation for cw CO₂ gasdynamic lasers operating at 16 and 14 μm wavelength*. Proc. Int. Conf. LASERS'80, New Orleans (USA) (STS Press, 1981) 627.
- [46] M. Brunné, A. Zieliński, J. Milewski, A. A. Vedeneev, A. Yu. Volkov, A. I. Demin, E. M. Kudriavtsev, *Analytical modelling of cw 18.4 μm gasdynamic lasers*. III Int. Symp. on Gas-Flow and Chemical Lasers, Marseille 1980, Journ. de Phys. **41** Supl. 11 (1980) C9-183.

Patenty

- [47] A. A. Vedeneev, A. Yu. Volkov, A. I. Demir, E. M. Kudriavtsev, J. Milewski, *Medium aktywne dla lasera gazodynamicznego*. Zgłoszenie patentowe nr P-225344, UP PRL (zgłoszenie patentowe nr 2866917, ZSRR).

Aneks

Podsumowanie prac wykonanych w latach 1976 - 80 w temacie MR I.23 - 5.4.1*

(Opracował M. Godel)

W latach 1976 - 1980 prowadzono badania teoretyczne i eksperymentalne impulsowego lasera gazowego pracującego na mieszaninach gazów molekularnych przy ciśnieniu atmosferycznym z wyładowaniem poprzecznym prejonizowanym promieniowaniem ultrafioletowym (laser typu TEA).

* Prace kierowane przez dr. inż. Z. Rozkwitalskiego, pracownika Zespołu LPG od maja 1980.

W pierwszym etapie prowadzono prace nad konstrukcją komory wyładowczej lasera TEA oraz współpracującej aparatury pomiarowo-badawczej [A3]. Wykonano badania optymalizacyjne lasera CO_2 typu TEA [A1, A2, A4]. Wyniki tych prac umożliwiły wykonanie oraz uruchomienie w Zakładzie Dynamiki Cieczy i Gazów IPPT lasera tego typu oraz wyposażenie stanowiska badawczego w specjalną sondę do pomiaru impulsów wysokoprądowych o krótkim czasie narastania.

Drugi etap obejmował studia teoretyczne i eksperymentalne kinetyki prejonizacji impulsów wyładowań w mieszaninach gazów o ciśnieniu atmosferycznym z domieszką gazów o niskim potencjale jonizacji do celów wzbudzenia laserowego. Opracowano technikę pomiaru koncentracji elektronów produkowanych przez fotojonizację molekuł gazów o niskim potencjale jonizacji [A5, A6, A7]. Opanowano metodykę pomiaru wartości chwilowych i lokalnych koncentracji elektronów [A8]. Przeprowadzono w szerokim zakresie pomiary rozkładów czasowo-przestrzennych koncentracji elektronów w typowych mieszaninach laserowych w zależności od zawartości domieszki o niskim potencjale jonizacji i dla różnych wartości E/p [A9, A10, A11]. Uzyskano podstawy do opracowania modelu teoretycznego wyładowania niesamoistnego sterowanego promieniowaniem ultrafioletowym. Otrzymano warunki niezbędne do formowania przestrzennie jednorodnego wyładowania impulsowego. Wstępny model takiego wyładowania [A12] został sprawdzony na drodze obliczeń numerycznych, które wykazały dobrą zgodność z eksperymentem. Prowadzono także dalsze badania charakterystyk wyładowczych, a także parametrów wyjściowych lasera CO_2 typu TEA w zależności od parametrów obwodów elektrycznych [A13].

Rezultaty studiów stanowią istotny wkład w rozumienie mechanizmów rozwoju jednorodnych wyładowań impulsowych w laserach gazowych pracujących przy ciśnieniach atmosferycznych, takich jak lasery CO_2 typu TEA lub lasery ekscymetrowe.

Wykaz publikacji do aneksu

- [A1] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Wpływ składu mieszaniny gazów na pracę lasera CO_2 typu TEA*. Abstracts, A-80, 120, EKON-76, Poznań 1976.
- [A2] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Badania optymalizacyjne impulsowego lasera CO_2 TEA z prejonizacją fotonową*. Biul. IMP PAN, nr 867/1976.
- [A3] M. Grodel, Z. Rozkwitalski, *Pomiary wysokoprądowych impulsów o nanosekundowym czasie narastania*. Biul. IMP PAN, nr 886/77.
- [A4] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Wpływ energii prejonizacji na koncentrację fotoelektronów w laserze CO_2 typu TEA*. Prace IMP, z. 76, 1978.
- [A5] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Photopreionization dynamics of CO_2 TEA laser*. Abstracts, A-19, 45, EKON-78, Poznań 1978.
- [A6] Z. Rozkwitalski, *Charakterystyki czasowe fotoprejonizacji w wysokociśnieniowych mieszaninach gazowych z dodatkiem par o niskim potencjale jonizacji*, II Symp. Wybranych Zagadnień Fizyki Plazmy, Kłodno, czerwiec 1978, Zesz. Nauk. IMP PAN 96, 82/957/79.
- [A7] Z. Rozkwitalski, *Influence of preionization discharge on the density of electrons produced by one-step photoionization*. Bull. Acad. Pol. Ser. Sci. Techn., 27, no. 4, 1979.
- [A8] Z. Rozkwitalski, *Rozkład przestrzenny elektronów produkowanych w procesie fotojonizacji jednostopniowej w laserach typu TEA*. Zesz. Nauk. IMP PAN, 79/983/79.
- [A9] M. Grodel, Z. Rozkwitalski, *Tripropylamine photoionization in CO_2 laser gas mixture*. Proc. Int. Conf. on LASERS'79, Orlando, Florida, USA, 1979.
- [A10] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Photoionization measurements in CO_2 laser gas mixture seeded with tripropylamine*. J. Appl. Phys., 51, nr 4, 2267 (1980).
- [A11] Z. Rozkwitalski, M. Grodel, *Effect of low-ionization gas additive on the UV photoelectron density in TEA CO_2 laser gas mixture*. Abstracts, A-8, 30, Poznań 1980.
- [A12] Z. Rozkwitalski, *Kinetics of preionization discharge in high-pressure gas laser*. Int. Conf. on LASERS'80, New Orleans.
- [A13] P. A. Atanasov, M. D. Petrova, M. Grodel, *Effect of „peaking” capacitor on the discharge characteristics and output parameters of TE CO_2 laser*. a) III Nacionalny Symp. po Prikladnoj Optike i Lazernoj Technike, 12 - 15 Jun. 1980, Gjułeczica, Bułgaria; b) OPTICA-80, November 1980, Budapest, Hungaria; c) Optical and Quantum Electronics (praca w druku).