

**Доц. д-р Илийчо Петков Илиев**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
на дисертация за присъждане на научната степен  
"Доктор на науките"

**Методики за развитие на лазери с пари на халогенидите с  
подобри изходни характеристики**

**Специалност: Лазерна физика, физика на атомите,  
молекулите и плазмата и физика на вълновите процеси**

**Рецензенти:**

- 1.
- 2.
- 3.

София

2015

Дисертацията се състои от 265 страници, 89 фигури, 85 таблици и 195 цитирани литературни източника. Брой на публикациите, свързани с дисертационния труд-33.

Доц. д-р Илийчо Петков Илиев е преподавател по физика в Катедра „Математика, физика и химия” на Технически университет-София, Филиал Пловдив.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от научен семинар на 11.02.2015 на научно направление „Лазерна физика и физика на атомите, молекулите и плазмата“, Институт по физика на твърдото тяло „Акад. Георги Наджаков”- БАН.

<http://www.issp.bas.bg>

ISSP-BAS-2015-DSci001

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... от..... часа в зала ..... на Институт по физика на твърдото тяло „Акад. Георги Наджаков” - БАН, бул. „Цариградско шосе” 72, пред научно жури в състав:

1. Чл. -кор. проф. дфн Петър Асенов Атанасов – ИЕ, БАН
2. Проф. дфн Кирил Борисов Благоев – ИФТТ, БАН
4. Проф. дфн Иван Иванов Желязков – СУ „Св. Климент Охридски“
3. Проф. дтн Иван Томов Димов – ИИКТ, БАН
5. Проф. дфн Румен Давидков Каканакоев – ИПФ, Пловдив
6. Проф. дмн Христо Илиев Семерджиев – ФМИ, ПУ ”Паисий Хилендарски”
7. Доц. д-р Стефка Стефанова Карталева – ИЕ, БАН

Номерацията на формулите, таблиците, фигурите и цитираната литература в автореферата съвпада с тяхната номерация в дисертационния труд.

## СЪДЪРЖАНИЕ

Обща характеристика на дисертационния труд .....	4
Въведение в проблемите на ЛПМ. Актуалност на темата.....	4
Цели и задачи на дисертационния труд.....	5
Структура и обем на дисертацията .....	6
Кратко описание на дисертационния труд.....	7
ГЛАВА 1. Въведение в проблемите на ЛПМ. Цели и задачи на дисертационния труд. ....	7
Обект на изследване .....	8
Обзор на съществуващите методи и модели.....	9
ГЛАВА 2. Уравнение на топлопроводност и неговото аналитично и числено решаване .....	10
Описание на проблема за газовата температура на ЛМП .....	10
Аналитичен модел на температурния профил на лазер с пари на меден бромид .....	10
Определяне на температурата на газа за ултравиолетов $\text{Cu}^+ \text{CuBr}$ лазер .....	15
Температурен профил на газа в $\text{He-SrBr}_2$ лазер.....	18
ГЛАВА 3. Статистическо изследване на лазер с пари на меден бромид, излъчващ във видимата област .....	21
Статистически методи и техники за изследване и развитие на лазери с пари на халогенидите .....	21
Факторен анализ на изходната лазерна мощност $P_{out}$ на лазер с пари на меден бромид....	21
Клъстерен анализ на изходната лазерната мощност .....	23
Факторен анализ на лазерната ефективност $Eff$ .....	25
Анализ и интерпретация на получените резултати от факторния анализ .....	26
Регресионен анализ за лазерната мощност и ефективност. Линеен полиномни модели...	26
Линеен регресионен модел №1 от първа степен за изходната лазерна мощност .....	28
Квазинелинеен модел № 2 от втора степен за $P_{out}$ с 387 данни .....	30
Анализ на резултатите от развитите модели за изходната лазерна мощност $P_{out}$ .....	31
ГЛАВА 4. Статистическо изследване на UV $\text{Cu}^+ \text{Ne-CuBr}$ лазер .....	34
Клъстерен анализ на основните параметри на лазера.....	34
Факторен анализ на UV лазер.....	35
Регресионен анализ на UV лазер.....	36
Статистическо изследване на времето на живот на UV лазер .....	38
Нелинеен модел от втора степен за времето на живот на UV лазер .....	40
Заклучение и перспективи .....	42
Литература.....	44
Публикации, свързани с дисертацията .....	54
Апробация на получените резултати .....	56
Справка за научни приноси, защитавани от автора на дисертацията .....	58

## Обща характеристика на дисертационния труд

### Въведение в проблемите на ЛМП. Актуалност на темата

Лазерите с метални пари (ЛМП) и техните съединения продължават да се развиват изключително интензивно, благодарение на широкото им приложение в техниката, медицината, екологията и научните изследвания. Създаването на нови лазерни източници с повишена изходна лазерна мощност значително разширява диапазона на тяхното приложение. Счита се, че експериментално и теоретично ЛМП са сравнително добре изучени. Едновременно с чисто експерименталните изследвания, съществуват и продължават да се създават голям брой аналитични и числени модели, описващи отделните лазерни системи. Независимо, че са постигнати много резултати в това направление, все още остават много незадоволително решени проблеми, както от непълното познаване на всички протичащи в разряда процеси, така и в чисто конструктивно отношение [1-3]. Специално за ЛМП в няколко обзорни статии, наред с разглежданите математически модели, бе изразено мнението, че резултатите от съществуващите модели и моделирането са едностранчиви и изостават от експерименталните изследвания [3-6]. В частност, в областта на лазерите с халогениди на металите, които се изследват в дисертационния труд, разработените досега модели като качество и подходи са недостатъчни и непълни. Лазерите с пари на меден бромид имат индустриално производство и тяхното по-нататъшно усъвършенстване се нуждае от нови модели. Също така голяма е необходимостта и от построяване на нови аналитични и компютърни модели за активно развиващите се през последните 5-10 години ултравиолетов йонен лазер с пари на меден бромид и лазер с пари на stronциев двубромид. Тяхното приложение е с големи перспективи. По тази причина теоретичните и експериментални изследвания в областта на лазерите с метални пари и техните съединения продължават да са обект на голям брой научни публикации, монографии, патенти и др., виж [6,7] и цитираната там литература.

Пълното експериментално изследване на взаимното влияние на всички фактори върху изходните характеристики на дадена лазерна система е непосилна експериментална задача. Не на последно място трябва да се отбележи фактът, че някои характеристики като газовата температура, електронната температура, интензитет на електричното и магнитното поле, по принцип не могат да бъдат измерени, а други измервания са ненадеждни. Последното е свързано с изолираност на активната лазерна тръба, високата честота на повторение на импулсите, късия фронт на нарастване и продължителността на импулсите, сложният кинетичен характер на протичащите процеси, електромагнитните смущения, които се генерират от импулсния разряд и др.

Един от най-важните проблеми за ЛМП и техните съединения е поддържането на оптимален температурен режим на лазерната тръба [1, 2, 6, 7]. Със създаване на лазери с повишена изходна мощност този проблем става все по-актуален. Температурата оказва влияние на общия физически срок на годност на лазера, на понижението на лазерната радиация с течение на времето и на качеството на лазерния лъч. Важно е да се отбележи, че директното измерване на температурата на неутралния газ вътре в лазерната тръба не е възможно. Измерва се само температурата на някоя от външните стени на лазерната тръба с т. нар. термодвойка или по оптичен път, което за съжаление е доста неточно. Съществуващите до момента математически модели са неточни и неефективни, тъй като пресмятат газовата температура при условие, че се задава постоянна температура на външна стена на тръбата. Така в условията на моделиране на нови устройства, когато такава постоянна стойност на температурата на стената не е известна, не може да се определи и температурата в тръбата. Не се отчита и променливото радиално разпределение на плътността на обемната мощност в активния обем, нито условията на външната среда. Добре е известно, че разпределението на обемната плътност на мощността в напречното сечение на разряда е силно неравномерно [7]. Пресмятането на газовата температура има значение също така и като важен елемент на всички кинетични модели, описващи физичните процеси с течение на времето.

Натрупаният огромен експериментален материал до този момент не е бил предмет на статистическа обработка. Използване на статистически техники би позволило по нов начин да се разгледат въпросите, свързани с лазерната генерация и други изходни характеристики чрез извличане на съществена информация от събраните експериментални данни. Специфичните особености на статистическия подход биха позволили да се потвърдят по нов начин вече известни зависимости и да се установят нови такива, които не могат да бъдат получени както експериментално, така и със съществуващите до този момент математични и физически модели.

На базата на изложеното дотук, можем да **формулираме някои важни нерешени проблеми**, стоящи пред развитието на лазерите с пари на металите, от гледна точка на тяхното моделиране:

*А) В областта на температурния режим:*

- Недостатъчно добре е изследвано разпределението на газовата температура в активния лазерен обем и съществуващите модели не дават възможност за коректно определяне на температурния профил;
- Не са развити физични модели, които да отчитат сложната природа на топлопредаването от активния лазерен обем към околната среда;
- Не съществуват достатъчно добри методи и методики, които да позволяват определянето на средната температура на газовата среда, което е важна характеристика при температурния анализ на лазерния източник;
- Не съществуват методи, подходящи за оценка на температурата на газа при разработване на нови лазерни източници.

*Б) В областта на статистическото моделиране на реални лазерни системи:*

- Независимо от голямото количество експериментални данни в областта на лазерите с пари на халогенидите, последните не са били предмет на статистическо изследване и анализиране;
- Не са изследвани сложната природа на взаимодействие както между независимите лазерни величини, така и тяхното единично и колективно влияние на изходните лазерни параметри (изходна лазерна мощност и ефективност, време на живот на лазерния източник);
- Не е направена оценка за лазерния източник като нелинеен физически обект, не е изследвано сложното нелинейно взаимодействие от втора, трета и по-висока степен на независимите величини на изходните лазерни характеристики (изходна лазерна мощност, лазерна ефективност, време на живот на лазерната тръба);
- Няма развити статистически методики за извличане на съществена информация на базата на наличните експериментални данни за усъвършенстване на съществуващи лазерни източници и разработване на нови такива по предварително зададен критерий.

## **Цели и задачи на дисертационния труд**

На базата на разгледаните нерешени проблеми в областта на моделите ще формулираме основните цели и задачи на този труд.

Основните **цели** дисертационния труд са:

*В областта на определяне на температурата на газовия разряд:*

1.1. Пресмятане на радиалния топлинен поток в напречното сечение на лазерната тръба, в т.ч. и в лазерни източници със сложна геометрия с дефиниране на нови гранични условия, които по-адекватно да отразяват процесите на топлоотдаване на системата лазерната тръба - околното пространство;

1.2. Оценка на влиянието на радиалното разпределение на подаваната електрическа мощност на радиалното разпределение на газовата температура;

1.3. Пресмятане на средната температура на газовия разряд.

*В областта на статистическото моделиране:*

1.4. Развитие на методика за прилагане на класификационен анализ (кълстерен, факторен и регресионен) за оценяване на взаимната връзка и зависимост между величините и установяване степента на влияние на независимите лазерни параметри на изходните лазерни величини (лазерна мощност и ефективност, време на живот на лазерния източник);

1.5. Развитие на методика за проектиране на нови лазерни източници с използването на линейни параметрични модели за определяне на изходните лазерни величини (лазерна мощност и ефективност, време на живот на лазерния източник);

1.6. Развитие на методика за проектиране на нови лазерни източници с използването на нелинейни параметрични модели от втора и трета степен за определяне на изходните лазерни величини (лазерна мощност и ефективност, време на живот на лазерния източник);

1.7. Установяване на нови зависимости за обясняване на сложната природа на процесите в активния лазерен обем, които не могат да бъдат получени по друг начин.

За постигането на поставените цели са дефинирани следните **задачи** :

*В областта на определяне на температурата на газовия разряд:*

2.1. Решаване на уравнението на топлопроводност при постоянна електрическа мощност в лазерния обем и нови гранични условия от трети и четвърти род;

2.2. Решаване на уравнението на топлопроводност при произволно зададено радиално разпределение на подаваната електрическа мощност и гранични условия от трети и четвърти род;

2.3. Предлагање на нова формула за определяне на средната температура на газовия разряд;

2.4. Развитие на нов физически модел при топлопренасянето в лазерен източник с две и повече тръби.

*В областта на статистическото моделиране:*

2.5. Прилагане на кълстерен, факторен и регресионен анализ за класифициране на независимите и зависими лазерни величини по предварително зададени критерии;

2.6. Прилагане на факторен и регресионен анализ за построяване на линейни параметрични модели на лазерната мощност и ефективност, и времето на живот на лазерния източник;

2.7. Прилагане на факторен и регресионен анализ за построяване на нелинейни параметрични модели от втора и трета степен за лазерната мощност и ефективност, и времето на живот на лазерния източник;

2.8. Анализ на получените резултати за изясняване на сложната природа на възникване на лазерната генерация и степента на влияние на най-важните физични процеси върху поведението на лазерния източник.

## **Структура и обем на дисертацията**

Дисертацията се състои от 4 глави, цитирана литература, публикации, свързани с дисертацията, апробация на получените резултати, забелязани цитирания, претенции за научни, научноприложни и приложни приноси.

Глава 1 не е приносна. В нея са разгледани съществуващите проблеми в лазерите с пари на металите и техните съединения от позицията на тяхното моделиране. Обосновани са целите и задачите на дисертационния труд. Направено е описание, техническа характеристика и приложения на обектите на изследване в дисертационния труд. Направен е подробен обзор на съществуващите структурни и феноменологични модели.

Втора глава е посветена на уравнението на топлопроводност и неговото аналитично и числено решаване. Определена е важността на познаването на температурата на газа за лазерите с пари на металите и техните съединения. Развита е аналитичен модел за определяне на температурата на газа в разглежданите три вида лазери: CuBr лазер, излъчващ във видимия диапазон, на ултравиолетов (UV Cu<sup>+</sup> CuBr) лазер и на SrBr<sub>2</sub> лазер. Разгледани са гранични условия от трети и четвърти род. Получени са решения на уравнението с променлива по

сечението на тръбата обемна плътност на подаваната електрическа мощност. Разгледани са случаи на естествена и принудена конвекция. Направена е оценка на разпределението на температурата в стените на лазерната тръба. Проведени са примерни симулации за определяне на температурата на газа при различни начални условия. Предложен е обобщен температурен модел, който позволява да се определи температурата на газа при произволно разпределение на подаваната електрическа мощност. Предложена е формула за изчисляване на средната температура на газа. Направен е анализ и оценка на получените резултати. Развит е числен двумерен модел за определяне на температурата на газа в напречното сечение на CuBr лазер, като са отчетени всички конструктивни особености на лазерната тръба, температурата на електродите и температурата на резервоарите с меден бромид. Направена е оценка на получените резултати и е направено сравнение с резултатите от аналитичните модели.

В трета глава е проведено статистическо изследване на лазер с пари на меден бромид (CuBr лазер), излъчващ във видимия диапазон. В началото на главата е направен кратък обзор на използваните статистически методи: клъстерен анализ, факторен анализ и регресионен анализ. Извършени са класификации с помощта на факторния и регресионен анализ. Разгледани са степента на влияние на 10 независими величини на зависимите величини лазерна мощност и ефективност. Определена е степента на влияние на всяка една от независимите величини. Определени са величините, които имат съществено влияние върху разглежданите зависимости такива. Развити са полиномни регресионни модели от първа, втора и трета степен за изходната лазерна мощност и ефективност. Направено е сравнение на тези модели с известни експериментални данни и е оценена тяхната грешка. Извършени са компютърни симулации за проектиране на нови лазерни източници с повишени изходни характеристики. Направена е оценка за статистическата адекватност на получените резултати. Извършен е анализ и физическа интерпретация на получените резултати.

В глава 4 е проведено статистическо изследване на UV Cu+ Ne-CuBr лазер. Проведен е клъстерен и факторен анализ. Разгледано е влиянието на 10 независими величини на изходната лазерна мощност. Извършени са класификации на основата на понятията „корелация” и „близост”. Построен е параметричен модел от втора степен за изходната лазерна мощност. Извършена е оценка на получените резултати с известни експериментални данни. Изследвана е статистическата адекватност и достоверност на резултатите. Извършени са компютърни пресмятания с цел конструиране на нови лазерни източници с повишена изходна мощност. Разгледана е изходната величина време на живот на лазерната тръба. Проведен е факторен и клъстерен анализ. Построени са параметрични регресионни уравнения от първа и втора степен. Извършен е анализ и физическа интерпретация на получените резултати с цел определяне на тези независими величини, които оказват съществено влияние на срока на служба на лазерната тръба.

## **Кратко описание на дисертационния труд**

### **ГЛАВА 1. Въведение в проблемите на ЛПМ. Цели и задачи на дисертационния труд**

Разгледани са съществуващите проблеми в развитието на лазерите с пари на металите и техните съединения от позициите на тяхното развитие и свързаното с това моделиране. Посочена е връзката с повишаващата се цена на експерименталния труд, поради сложността на процесите в лазерната среда. Теоретичните изследвания и свързаните с тях модели стават неотменна част от развитието на този тип лазери. Разгледани са конкретни проблеми, свързани с развитието на лазерните източници. В частност не достатъчно е изучено разпределението на температурата на газа в лазерната среда и свързаното с това негативно влияние на процесите на възникване на лазерната генерация. До този момент има натрупано голямо количество експериментален материал, който не е бил предмет на статистическо изследване. Посочено е, че използването на различни статистически техники позволява по нов начин да се разглеждат и изучават сложните процеси в активната лазерна среда. Статистиката позволява по нов начин да се конструират нови

лазерни източници с повишени изходни характеристики. Определени са целите и задачите на дисертационния труд.

### 1.3. Обект на изследване

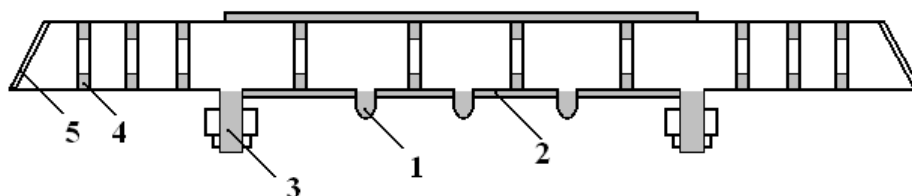
Конкретен физически обект в този дисертационен труд са следните типове лазери с метални пари (ЛМП) и в частност лазери с халогениди на металите:

- Лазер с пари на меден бромид
- Ултравioletов йонен лазер с пари на меден бромид
- Лазер с пари на стронциев бромид

Всички лазери, изследвани в дисертационния труд са оригинални български изобретения, патентовани с български и международни патенти. Създадени са от екипа на Лабораторията по лазери с пари на металите към ИФТТ на БАН, София през последните 30-40 години.

Лазерът с пари на меден бромид е добре известен като източник с пулсираща радиация във видимата зона (400-720 nm), в две дължини на вълната: зелена - 510.6 nm и жълта - 578.2 nm.

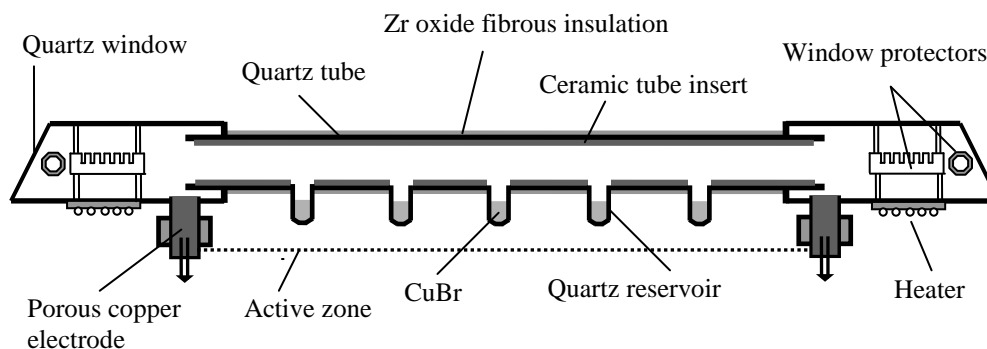
Схема на лазерната тръба е показана на Фиг. 1.1.



Фиг. 1.1. Схема на конструкцията на лазерната тръба на лазер с пари на меден бромид:  
1 – резервоари с меден бромид, 2 – топлинна изолация в областта на активния обем,  
3 – медни електроди, 4 – вътрешни диафрагми, 5 – огледала.

Лазери с пари на меден бромид с различни конструкции и характеристики имат широко приложение в практиката и научните изследвания [11, 12, 2, 6]. Използват се в медицината основно в дерматологията и фотокоагулацията [13-30]. Лазери и лазерни системи с пари на меден бромид се използват за микрообработка на различни видове материали: пробиване, рязане, маркиране, гравирание, както и множество други приложения [31-51].

Медният йонен лазер с пари на меден бромид е иновационен продукт с големи перспективи поради уникалните си свойства и стабилна работа. Първите лазери от този тип са конструирани в лабораторията по ЛМП към ИФФТ на БАН през 1999 г. Този лазер излъчва в ултравioletовия спектър в пет дължини на вълната (248.6, 252.9, 259.7, 260.0 и 270.3 nm). Установено също, че малки добавки на водород (0.02-0.04 torr) увеличават двойно лазерната мощност. Обща схема на лазерната тръба е дадена на Фиг. 1.4.



Фиг. 1.4. Конструкция на лазерната тръба на УВ йонен лазер с пари на меден бромид.

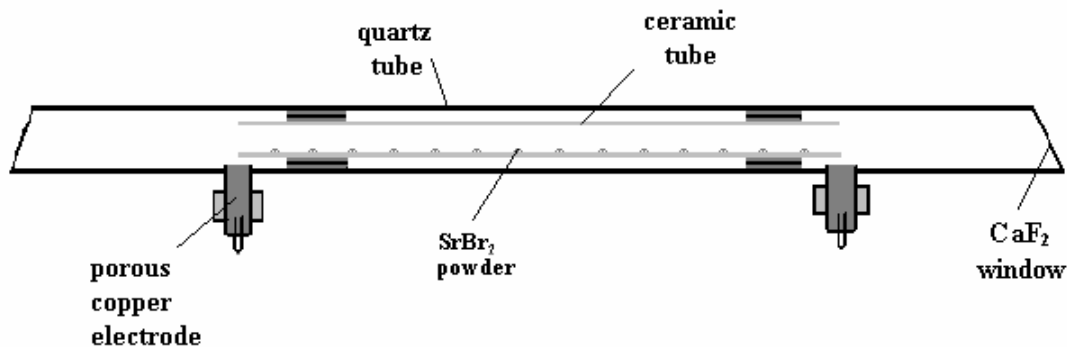
Поради тесния диапазон на излъчването в няколко спектрални линии и високата кохерентност на лъча медният йонен лазер с пари на меден бромид се прилага за обработки,



където е необходима висока разрешителна способност, запис на информация, флуоресценция, фино пробиване, рязане, изчистване, модифициране на нови материали др. [52-56].

Лазерът с пари на  $\text{SrBr}_2$  е алтернатива на лазерите на свободни електрони и лазерите с пари на чист стронций. Този тип лазер намира по-нататъшно развитие в [62-65], като е достигната изходна лазерна мощност до 4.26 W, при което 90% от генерацията е линията 6.45  $\mu\text{m}$ . Обща схема на лазерната тръба е дадена на Фиг. 1.5.

Лазерът с пари на стронциев бромид има приложения и възможности за приложения почти навсякъде, където се използва лазер с пари на стронций: в медицината, литографията, фотохимията, фотобиологията, за изучаване на влажността на атмосферата и др. [12, 60, 57, 58].



Фиг. 1.5. Конструкция на лазерната тръба на стронциев лазер.

#### **1.4. Обзор на съществуващите методи и модели**

Независимо, че представеният дисертационен труд не разглежда кинетични модели, за сравняване е направен преглед на основните съществуващи модели от този тип.

Разгледани са публикации на голяма група американски автори (Кушнер, Уорнър) [79, 80], австралийски учени (Карман и др.) [81-85]. Голяма група изследователи от Zhejiang University, Hangzhou, Китай, работи повече от 25 години по проблемите на моделирането на лазери с медни пари и кинетично подобрени варианти, лазери с пари на меден бромид, стронциев йонен лазер и други ЛМП [86-93]. Най-многобройни са публикациите по моделиране на ЛМП от руски автори [6, 75, 77, 78, 96-103]. Разгледани са работите и на група български учени от ИФТТ, БАН [104, 105]. През последните няколко години в [106-117] бяха построени нови аналитични модели, подобряващи модела на Кушнер и Уорнър от 1983 г. [80], широко използван досега за лазери с пари на металите. Няма да правим подробен обзор на статиите [106-117], защото те са включени в настоящия дисертационен труд и подробно са развити в Глава 2.

Феноменологичните модели в областта на ЛМП се появиха едва през последните години и все още не са получили необходимото внимание от физическата общност. В [120-125] са разгледани работите на китайски автори. Приложен е статистическият метод на ортонормирания дизайн на експеримента за оптимизиране параметрите на разрядната електрична верига на захранването на  $\text{CuBr}$  лазер. Разработени са генетични алгоритми за оптимизиране на индуктивно-капацитивните параметри на електрозарядната верига и за изследване на кинетичните процеси в плазмата в кинетично подобрен (оптимизиран) лазер с медни пари, лазер с медни пари с добавка на водород.

На базата на натрупаните през последните 30 години експериментални резултати в ИФТТ на БАН бяха направени статистически обработки с многомерен факторен, клъстерен, регресионен анализ и др. Обект на изследване са лазер с пари на  $\text{CuBr}$ , излъчващ във видимия диапазон, лазер с пари на  $\text{CuBr}$ , излъчващ в ултравиолетовата област и лазер с пари на  $\text{SrBr}_2$ , излъчващ в инфрачервената област, [118, 126, 134, 137-146]. Резултатите от тези публикации са включени в глави 3 и 4 на настоящия труд. В областта на непараметричните модели са получени и редица нови резултати, на базата на техниката на многомерните адаптивни регресионни сплайни (MAPS) и методите на класификационните и регресионни дървета (CART) [147-151]. Тези модели се разработват за първи път и не са предмет на настоящия труд.

## ГЛАВА 2. Уравнение на топлопроводност и неговото аналитично и числено решаване

### 2.1. Описание на проблема за газовата температура на ЛМП

Температурата на газа е важна термодинамична характеристика на активната лазерна среда. Тя определя срока на служба на лазера, спада на лазерната генерация във времето, разпределението на неутралните атоми в напречното сечение на тръбата. Газовата температура е свързана с термичното заселване на долните лазерни нива и по този начин влияе на лазерната мощност и модовия състав на лазерния лъч. Високата температура може да предизвика термойонизационна и електройонизационна нестабилност на газовия разряд. Високата температура на газа може да доведе до термохимична деградация и замърсяване на активната среда. Ето защо, както по време на работа на лазера, така и при компютърни симулации, газовата температура следва да се следи и контролира.

В параграф 2.2 е направено описание на съществуващия модел за определяне на газовата температура, публикуван през 1983 г. [80], който на практика е бил единственият до първата публикация на тези тема през 2008 [D1]. Развитият модел [80] има следните 3 основни недостатъка: а) необходимо е познаване температурата на стената на лазерната тръба (гранични условия от I и II род); б) приема се, че обемната плътност на мощността е разпределена равномерно по радиуса на тръбата; в) не се отчита разпределението на температурата по дебелината на лазерната тръба. Целта на втора глава е на основа на серия публикации на тази тема да се създаде принципно нов температурен модел, който да отстрани цитираните по-горе недостатъци. Развитият нов температурен модел разглежда детайлно реакцията на лазерната тръба по отношение на газовия разряд като източник на топлина и реакцията на лазерната тръба с околната среда при нейното охлаждане. Разглеждат се различни профили на разпределение на обемната плътност на приложената електрическа мощност в газовия разряд. Детайлното отчитане на тези физически процеси предполага и по-достоверно определяне на температурния профил по радиуса на тръбата. Развита е също двумерен числен модел в надлъжно вертикално сечение на лазера през електродите, който по-детайлно отчита всички геометрични и конструктивни особености на газовата тръба. Целта на изследванията е прилагането на развитите модели и получени резултати за подобряване работата на съществуващи лазерни източници и подпомагане разработването на нови такива с повишени изходни характеристики.

### 2.3. Аналитичен модел на температурния профил на лазер с пари на меден бромид [D1,106], [D2, 107], [D3,108], [D4,109]

Геометричните размери на напречното сечение на тръбата са дадени на фиг. 2.2 . Лазерната тръба е изработена от кварц, която в областта на активния лазерен обем е покрита с допълнително термоизолационно покритие - стъклена вата, минерална вата или вата от циркониев двуокис. За развитие на моделите е използван лазер с пари на меден бромид от [156].

За определяне на температурния профил е необходимо решаване на двумерното стационарно уравнение на топлопроводност в напречното сечение на тръбата (фиг. 2.1.) от вида:

$$\operatorname{div}(\lambda_g \operatorname{grad} T_g) + q_v = 0 \quad (2.1)$$

където  $\lambda_g$  е коефициент на топлопроводност на газа,  $q_v$  е обемната плътност на мощността на вътрешния източник на топлина, а  $T_g$  е температурата в тръбата. Това уравнение по-нататък се разглежда по радиуса на тръбата, с което се отчита радиалната симетрия.

За решаване на уравнението (2.1) най-често в литературата се използват гранични условия от първи и втори род от вида

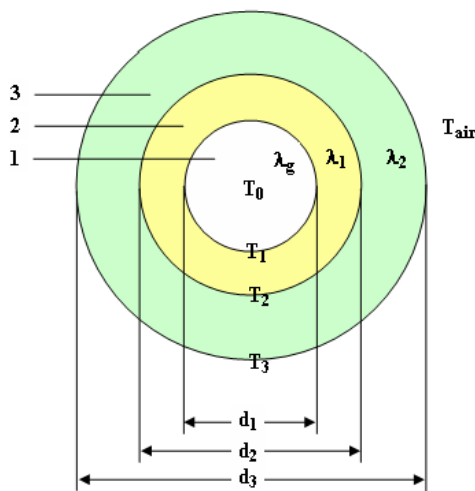
$$T_g(R_1) = T_w, \quad \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad . \quad (2.2)$$

където  $0 < r < R_1$ ,  $R_1$  е вътрешният радиус на тръбата, като при това опростено се задава температурата не на вътрешната, а на външната страна на кварцовата тръба (под изолацията), т.е. полага се приближено  $T_w = T_2 = T_1$ .

Обикновено в (2.1) величината  $\lambda_g$  се приближава във вида  $\lambda_g = \lambda_0 T_g^m$ , където  $\lambda_0, m$  са константи. Ако условно се приеме, че е известна температурата на вътрешната стена на тръбата  $T_1 = T_2 = T_w$ , то веднага се проверява, че аналитичната формула на решението  $T_g(r)$  на задачата (2.1)-(2.2) е [80]:

$$T_g(r) = \left[ T_w^{m+1} + \frac{(m+1)q_v}{4\lambda_0} (R^2 - r^2) \right]^{\frac{1}{m+1}}. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) е справедлива при постоянна стойност на обемната плътност на мощността по радиуса на тръбата, т.е.  $q_v(r) = const$ . Заедно с пренесеното приближено условие  $T_1 = T_2 = T_w$ , това опростяване се използва широко при определяне на температурния профил в лазер с пари на меден бромид [104], а също така при компютърни симулации за лазер с пари на чиста мед [155] и лазер с пари на SrBr<sub>2</sub> [63, 64].



Фиг. 2.2. Геометрия на напречния разрез на лазерната тръба на лазер с пари на меден бромид [156] в областта на активния обем:  
1- разряд, 2- кварцова тръба, 3 – външна изолация надлъжно по активния обем, диаметри:  $d_1 = 60mm$ ,  $d_2 = 64mm$ ,  $d_3 = 74mm$ .

За решаване на уравнение (2.1) вместо гранични условия (2.2) в този параграф са разгледани смесени гранични условия от трети и четвърти род, които за цилиндрична конфигурация имат вида [158, 159]:

$$T_1 = T_2 + \frac{q_l \ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_1}, \quad T_2 = T_3 + \frac{q_l \ln(d_3/d_2)}{2\pi\lambda_2} \quad (2.4)$$

$$Q = \alpha F_3 (T_3 - T_{air}) + F_3 \varepsilon c \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{air}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.5)$$

Гранични условия (2.4) изразяват уравнението за непрекъснатост на топлинния поток на границата на две среди. Тук  $q_l$  е мощността на единица дължина,  $q_l = Q/l_a$ ,  $l_a$  - дължина на активната зона,  $\lambda_1, \lambda_2$  са съответно коефициентите на топлопроводност на кварцовата тръба и топлинната изолация,  $d_j, j = 1, 2, 3$  са диаметрите на съставлящите тръби. Гранично условие (2.5) описва начина на топлообмен между външната повърхнина на лазерната тръба и околната среда. То съдържа две събираеми. Първото събираемо отразява закона на Нютон-Рихман за топлообмен чрез конвекция, а второто – закона на Стефан-Болцман за топлообмен чрез излъчване. Величината  $Q = 4080W$  е общият топлинен поток, равен на общата консумирана електрическа мощност,  $\alpha$  е коефициент на топлопредаване на газа,  $F_3$  е външната активна повърхнина на

тръбата,  $\varepsilon$  е интегрален излъчвателен коефициент, зависещ от материала,  $c$  - излъчвателен коефициент,  $T_{air} = 300K$  - температура на въздуха.

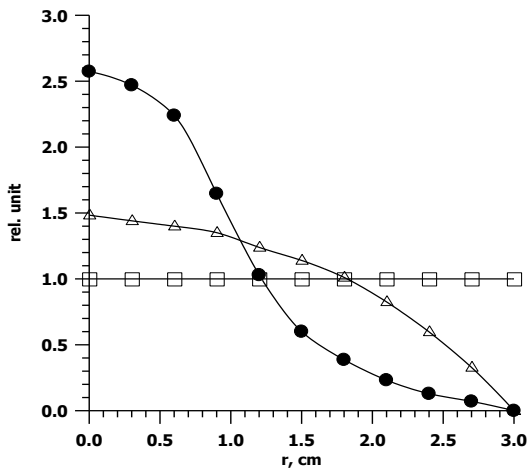
В дисертацията са изследвани подробно случаите на естествена и принудена конвекция с постоянна и променлива по радиуса обемна плътност на мощността, като предварително са определени необходимите параметри, включително са изведени общите формули за коефициента на топлопредаване  $\alpha$  в двата случая.

Тук ще се спрем подробно на обобщения температурен модел, параграф 2.3.5, който обхваща и обобщава всички развити модели за температурата на газа за лазер с пари на меден бромид, излъчващ във видимата област.

Общото решение за газовата температура в напречното сечение на разряда при произволна стойност на обемната плътност на мощността има следния вид:

$$T_g(r) = \left[ T_1^{m+1} - \frac{(m+1)}{\lambda_0} \ln r \int_{-\infty}^y e^{2t} q_v(e^t) dt \right]^{1/(m+1)}, \quad 0 \leq r < R_1. \quad (2.21)$$

Използването на формула (2.21) ще демонстрираме в случаите на някои конкретни разпределения на радиалното разпределение на обемната плътност на мощността. Разглеждаме два качествено различни типа разряди, показани на Фиг. 2.9. Крива 2 изобразява тих разряд. Крива 3 изобразява разряд, съсредоточен в центъра на тръбата, с наличие на инфлексна точка. При наличие на разпределение от типа на крива 3 е възможно деформиране на разряда, свиването му в шнур, възникване на термойонизационна неустойчивост и други негативни явления. За сравнение на Фиг. 2.10 е дадена и крива 1 - разпределението при  $q_v(r) = q_0 = \text{const}$ , като условно е взето  $q_0 = 1$ . Всички криви са построени при една и съща стойност на входната мощност в лазерната тръба (т.е. площите под всяка от кривите и оста  $Or$  са равни).



Фиг. 2.10. Примерни качествени радиални разпределения на обемната плътност на мощността в напречното сечение на лазерната тръба на лазер с пари на меден бромид в относителни единици:  
 □ - крива 1 ( $q_v(r) = q_0 = \text{const}$ ),  
 Δ - крива 2 от формула (2.22),  
 ● - крива 3 от формула (2.23).

Кривите 2 и 3 могат да се представят приближено чрез полиноми от втора и трета степен, съответно:

$$q_{v,2}(r) = K_1 q_0 (a + br^2), \quad (2.22)$$

$$q_{v,3}(r) = K_2 q_0 (n + pr^2 + sr^3), \quad (2.23)$$

където

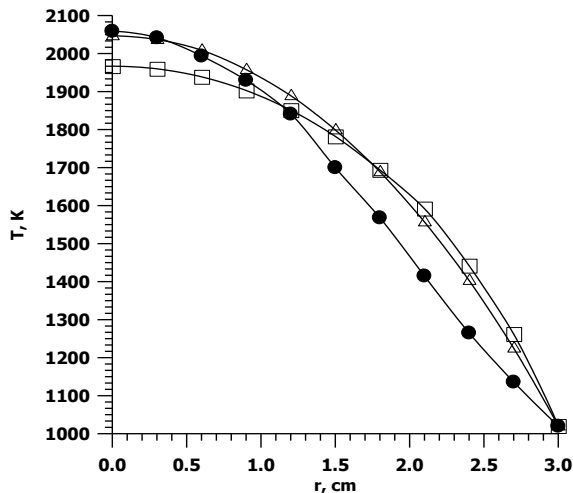
$$K_1 = 1.4383, \quad a = 1.0183471, \quad b = -0.001077, \quad (2.24)$$

$$K_2 = 2.57365, \quad n = 0.966892, \quad p = -0.47399, \quad s = 0.1249822. \quad (2.25)$$

Коефициентите (2.24)-(2.25) са получени по метода на най-малките квадрати. Замествайки последователно (2.22) и (2.23) във формулата (2.21) след интегриране получаваме формулите за резултатната газова температура, съответно за двата случая:

$$T_{g,2}(r) = \left( T_1^{m+1} - \frac{(m+1)K_1 q_0 (r^2 - R_1^2)(4a + br^2 + bR_1^2)}{16\lambda_0} \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (2.26)$$

$$T_{g,3}(r) = \left( T_1^{m+1} - \frac{(m+1)K_2 q_0 (100n(r^2 - R_1^2) + 25(r^4 - R_1^4) + 16s(r^5 - R_1^5))}{400\lambda_0} \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (2.27)$$

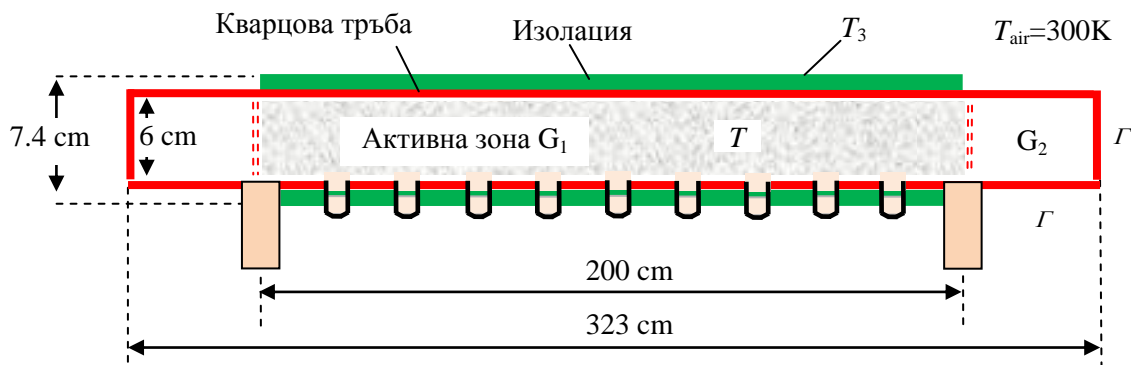


Фиг. 2.11. Разпределения на температурата в напречното сечение на тръбата, получени съответно:  
 □- крива 1, с уравнение (2.3),  
 Δ- крива 2, с уравнение (2.26),  
 ● - крива 3, с уравнение (2.27).

Проведените изчисления показват, че при използването на различни радиални разпределения  $q_v(r)$ , съответните стойности на  $T_g(r)$  в центъра на тръбата се отличават несъществено, в рамките на 2-3%. При  $q_v(r) \neq \text{const}$  най-простото представяне е (2.22), получено при  $q_v(r)$ , апроксимирано с полином от втора степен. Съответната формула на решението (2.26) е сравнително проста и удобна за изчисление. Може да се използва с добра точност при всички разпределения на  $q_v = q_v(r)$  за лазер с пари на меден бромид и близки такива.

В параграф 2.3.6 е развит числен модел за определяне разпределението на температурата на газа в надлъжното сечение на лазерната тръба [D5,110]. Целта е да се построи числен модел за пресмятане на газовата температура в надлъжното сечение на лазерната тръба. Моделът се основава на решаване на квазистационарното уравнение на топлопроводимост с фиксирана обемна плътност на мощността при нелинейни гранични условия, с отчитане на електродите, резервоарите с меден бромид, тръби, изолация и други конструктивни елементи на тръбата.

Разглеждаме двумерна геометрична конфигурация, показана на фиг. 2.13.



Фиг. 2.13. Надлъжен разрез на лазерна тръба на CuVg лазер: вътрешен диаметър на кварцовата тръба  $d_1 = 6\text{cm}$ , външен диаметър на кварцовата тръба  $d_2 = 6.4\text{cm}$ , външен диаметър на изолацията от Zr оксид  $d_3 = 7.4\text{cm}$ , дължина на лазерната тръба  $l_1 = 323\text{cm}$ , дължина на активната среда  $l_a = 200\text{cm}$ .

За определяне на разпределението на температурата на газа в разглежданото надлъжно сечение на лазерната тръба се изисква да решим уравнението на топлопроводност във вида:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v = 0, \quad (2.28)$$

където  $k(T)$  е коефициент на топлопроводност на средата,  $q_v$  е обемната плътност на мощността ( $q_v$ , W/cm<sup>3</sup> е известен в G<sub>1</sub>,  $q_v = 0$  в G<sub>2</sub>). Величината  $k(T)$  се представя във вида  $k(T) = \lambda_0 T^m$ , където  $\lambda_0$ ,  $m$  са константи.

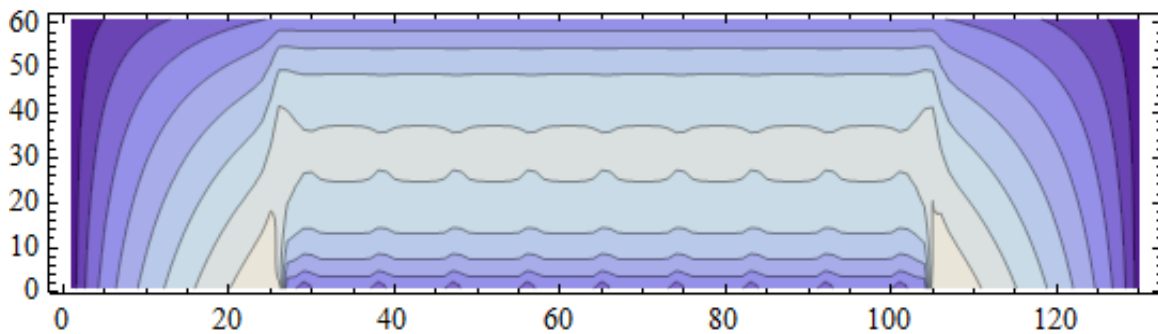
Граничните условия в режим на естествена конвекция са от типа (2.4) и (2.10). Допълнителните гранични условия имат следния вид:

$$T_r = T_{air}; \quad T_{electrode} = 2500K [157]; \quad T_{reservoir} = 490^\circ C; \quad T_{air} = 300K, \quad (2.31)$$

където  $T_r$  е температурата на външната граница на неактивните (студени) зони,  $T_{electrode}$  е температурата на електродите,  $T_{reservoir}$  е температурата на резервоарите с CuBr и  $T_{air}$  е температурата на околното пространство извън тръбата.

За решаване на поставената задача (2.28), (2.4), (2.10) и (2.31) след обезразмеряване е приложена класическа схема на крайните разлики от втори порядък на апроксимация с метод на свърхрелаксациите (метод на Либман). Температурата на вътрешните граници между активната и студените зони е апроксимирана с интерполация по Лагранж. Моделът и компютърните симулации са пресметнати с помощта на авторски код на Microsoft Studio / Fortran.

На Фиг. 2.17 е показана картина на температурата в напречното сечение на лазерната тръба. Тя има за цел качествено да даде обща картина на потенциалния температурен профил на тръбата.



Фиг. 2.17. Температурен профил на лазерната тръба в надлъжното сечение при електрическа мощност  $Q = 4800$  W.

Числените резултати от развития модел са в добро съответствие с по-рано получените резултати от аналитичен модел в предишните параграфи. За едни и едни и същи стойности на работните лазерни параметри при естествената конвекция и постоянна обемна плътност на енергията ( $Q_1=4080$  W) е получена максималната температура 2013 K. Това дава относителна грешка от 3 % по сравнение с  $T_{max}$  от развития аналитичен модел. Представеният числен модел е по-общ и може да се прилага за по-сложни геометрични конфигурации и изследвания.

В параграф 2.3.7 е направено заключение от развития температурен модел за CuBr лазер, излъчващ във видимата област. За първи път за лазерите с пари на меден бромид е развит нов аналитичен и числен модел, позволяващ да се определи температурата на газа в активния лазерен обем. Предложени са гранични условия от трети и четвърти род, които отчитат процеса на топлоотдаване на лазерната тръба с околното пространство. Това позволява да се определи възможният температурен профил на нови лазерни източници, за които не може предварително да се определи температурата на външната стена на тръбата. Определен е преимущественият топлинен процес на топлообмен с околната среда.

Разгледани са серия от радиални разпределения на подаваната електрическа мощност. Направена е оценка на степента на влиянието им на разпределението на температурата. Предложени са серия от аналитични формули, които позволяват да се определи радиалния профил на газа и е направена оценка за тяхната ефективност.

За първи път с цел практическо приложение е предложена аналитична формула за определяне на средната температура на газовия разряд.

Развит е числен метод, който отчита реални конструктивни особености и дизайн на лазерната тръба, електрически и температурни особености на граничните условия.

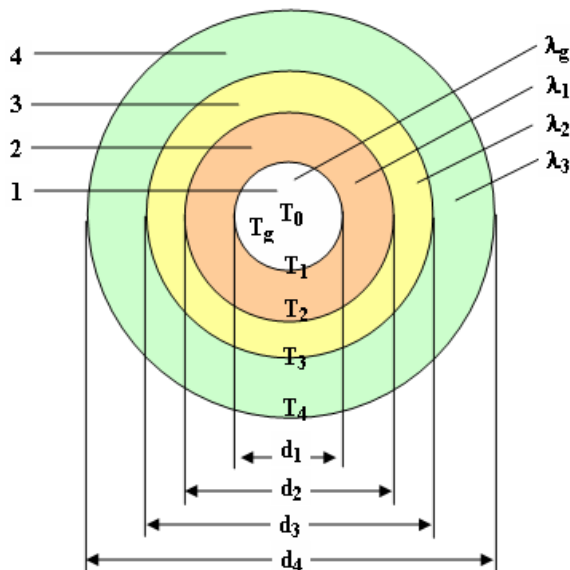
Проведени са примерни инженерно експерименти при решаване на конкретни задачи по планиране на експеримента.

## 2.4. Определяне на температурата на газа за ултравиолетов Cu+ CuBr лазер [D6,111],[D7,112],[D8,113]

Напоследък се наблюдава голям интерес в лазерите на парите на медния йон, действащ под 300 nm в спектралната област на дълбок ултравиолет. За първи път в [165] е получена лазерна генерация на четири линии: 248.6 nm, 252.9 nm, 260.0 nm и 270.3 nm от меден йон  $\text{Cu}^+$  в наносекунден, импулсно-периодичен разряд на Ne – CuBr. В [166] е получена рекордна средна изходна мощност на 1.3W при излъчване на няколко дължини на вълните. В активен обем от 23 cm<sup>3</sup> бе получена обемна плътност на мощността от 57 mW/cm<sup>3</sup>. За линията 248.6 nm бе получена пикова мощност от 3.25 W и средна мощност от 0.85 W.

Принципна схема на геометричния дизайн на сечението на лазерната тръба е дадена на Фиг. 2.19. Лазерният източник е изработен основно от кварц (3), като в областта на активния лазерен обем вътре в кварцовата тръба е поставена керамична тръба ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )-(2), а от външната страна е поставено допълнително термоизолационно покритие (4) от стъклена вата, минерална вата или вата с циркониев двуокис.

Основните работни характеристики са: обща входна електрическа мощност е  $P = 1300W$ , а ефективната мощност след отчитане на загубите е  $P_{in} = 1000W$ . Изходната лазерна мощност е  $P_{out}$ , която може да достигне до 650 mW [165, 166, 167, 53].



Фиг. 2.19. Геометрия на напречния разрез на лазерната тръба на ултравиолетов меден йонен лазер [166] в областта на активния обем: 1- разряд, 2- керамична тръба ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 3- кварцова тръба, 4- външна изолация, надлъжно по активния обем. Диаметърът  $d_1$  заема стойности от 5.2 mm, 5.8 mm и 8 mm, останалите са:  $d_2=18$  mm,  $d_3=24.5$  mm,  $d_4=28.5$  mm,  $R_1 = d_1 / 2$ .

В този параграф се прилагат аналитичните модели за определяне на температурата на газа, развити в параграф 2.3. Търси се разпределението на газовата температура, което при направените допускания удовлетворява двумерното стационарно уравнение на топлопроводност от вида (2.1) в напречното сечение на тръбата.

По аналогия с модела за CuBr лазер (стр. 10), построяваме следния математически модел, включващ уравнението на топлопроводност и гранични условия от трети и четвърти род в цилиндрична конфигурация, като се отчита фактът, че броят на тръбите е три:

$$T_1 = T_2 + \frac{q_l \ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_1}, \quad T_2 = T_3 + \frac{q_l \ln(d_3/d_2)}{2\pi\lambda_2}, \quad T_3 = T_4 + \frac{q_l \ln(d_4/d_3)}{2\pi\lambda_3}, \quad (2.34)$$

$$Q_1 = \alpha F_4 (T_4 - T_{air}) + F_4 \varepsilon c \left[ \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{air}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.35)$$

където  $T_j$  са температурите на стените на тръбите,  $j = 1, \dots, 4$ , (както е показано на Фиг. 2.19),  $\alpha$  е коефициент на топлопредаване.

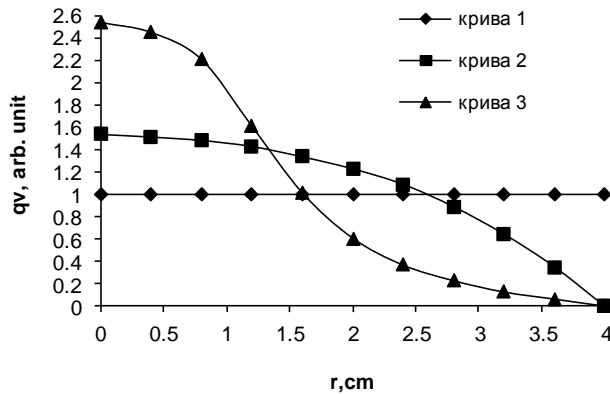
Изучени са случаите с равномерно и неравномерно разпределение на обемната плътност на мощността по сечението на тръбата в условията на естествена и принудена конвекция.

В параграф 2.4.6 на базата на уравнение (2.21) е представен обобщен температурен модел за UV Cu+ CuBr лазер, аналогично на параграф 2.3.5 от дисертацията, отнасящ се за CuBr лазер, излъчващ във видимия диапазон. Целта на настоящия параграф е да се приложи обобщената формула (2.21) за случая с ултравиолетов Cu+ CuBr лазер.

За примерно приложение на общото решение (2.21) ще разгледаме два качествено различни типа разряди, които са показани на фиг. 2.28. Крива 2 показва разпределението на обемната мощност при разряд, изпълнил почти изцяло напречното сечение на активния обем. Крива 3 е случай на разряд, който се характеризира със съсредоточаване на мощността в центъра на тръбата и разпределението се характеризира с инфлексна точка. За сравнение, отново е дадено и разпределението на обемната мощност при  $q_v(r) = q_0 = const$ . Отново, както и в предния параграф, криви 2 и 3 са представени като полиноми от втора и четвърта степен, получени по метода на най-малките квадрати:

$$q_{2,v}(r) = K_1 q_0 (a_1 + b_1 r^2) \quad (2.40)$$

$$q_{3,v}(r) = K_2 q_0 (a_2 + b_2 r + c_2 r^2 + f_2 r^3 + e_2 r^4) \quad (2.41)$$



Фиг. 2.28. Разпределение на обемната плътност на мощността.

- ◆ - крива 1-  $q_v(r) = q_0 = const$  ;
- - крива 2-  $q_{2,v}(r) = K_1 q_0 (a_1 + b_1 r^2)$  ;
- ▲ - крива 3-  $q_{3,v}(r) = K_2 q_0 (a_2 + b_2 r + c_2 r^2 + f_2 r^3 + e_2 r^4)$

Полученото разпределение на температурата съгласно общото решение (2.27) и удовлетворяващи гранични условия (2.34)-(2.35) е: за крива (2.40) е (2.42), а за крива (2.41) е (2.43).

$$T_g(r) = \left( T_1^{m+1} - \frac{(1+m) K_1 q_0 (r^2 - R_1^2) (4a_1 + b_1 r^2 + b_1 R_1^2)}{16\lambda_0} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (2.42)$$

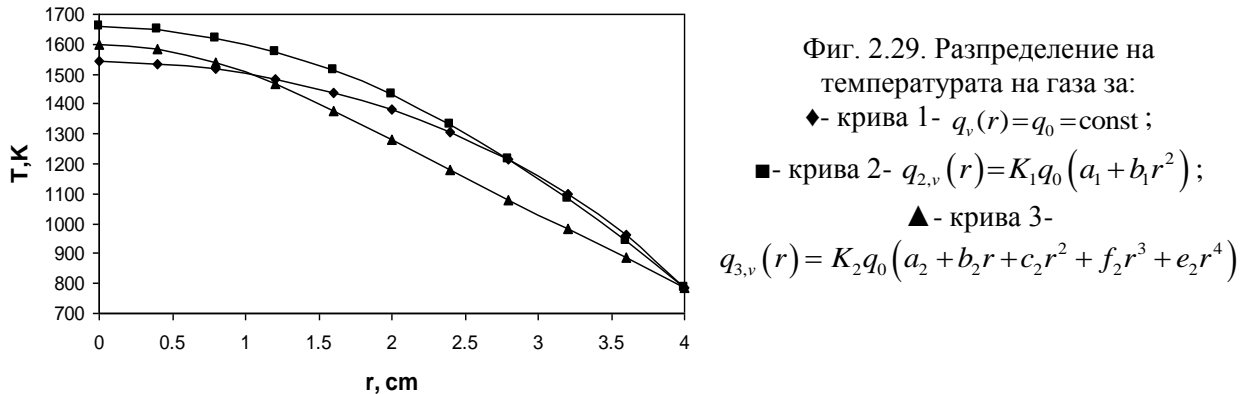
$$T_g(r) = \left( T_1^{m+1} + \frac{K_2 q_0 (m+1)}{\lambda_0} \left( \frac{1}{4} a_2 (r^2 - R_1^2) + \frac{1}{9} b_2 (r^3 - R_1^3) + \frac{1}{16} c_2 (r^4 - R_1^4) + \frac{1}{25} f_2 (r^5 - R_1^5) + \frac{1}{36} e_2 (r^6 - R_1^6) \right) \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (2.43)$$



Ще разгледаме само случая на естествена конвекция, тъй като има по-голямо практическо приложение. На Фиг. 2.29 в една координатна система са показани разпределенията на  $T_g(r)$  за разглежданите три типа криви.

Получените резултати показват, че решение (2.3), което е най-масовото използвано в специализираната литература, по сравнение с (2.42) и (2.43), дава относително отклонение средно 5.6%. Това показва, че то може да продължава да се използва за анализ на температурния профил на газа, поради простотата на формулата и удобството на нейното прилагане. В абсолютна стойност разликата на температурата, определена с (2.3), в сравнение с (2.42) и (12.43) може да бъде повече от 100°C. Разликата на температурите  $T(0)_{\max}$  между  $q_{2,v}(0)$  и  $q_{3,v}(0)$  в относителни единици е 3.7%, което означава, че и двете формули могат да се използват успешно за по-точно предвиждане на газовата температура. Формула (2.42) има по-прост вид и нейното прилагане е по-лесно.

Повишаването на температурата в центъра на разряда със 100 °C може да доведе до намаляване на лазерната мощност и влошаване на модовия състав. По тази причина, независимо от привидната сложност на (2.42) по сравнение с (2.3), нейното използване е препоръчително.



В параграф 2.4.7 е развита методика за пресмятане на средната температура в активния обем. Получени са няколко формули за определяне на средната температура за радиалното разпределение на  $T_g(r)$  за различни качествени типа радиални разпределения. След сравнение на получените резултати е предложена опростена формула от вида:

$$\bar{T}_g \approx T_1 \left( 1 + \frac{(m+1)q_v R_1^2}{4\lambda_0 T_1^{m+1}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \left( 1 - \frac{q_v R_1^2}{3 \left[ (m+1)q_v R_1^2 + 4\lambda_0 T_1^{m+1} \right]} \right) \quad (2.48)$$

Средната стойност на температурата, изчислена с (2.48) за УВ лазер е  $\bar{T}_g = 1358$  К .

Направени са следните изводи за този тип лазер.

При аналитичното определяне температурата на газа в UV Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr за пръв път се прилага по-рано получена формула за общото решение, което отчита неравномерното разпределение на обемната плътност на електрическата мощност по сечението на лазерната тръба.

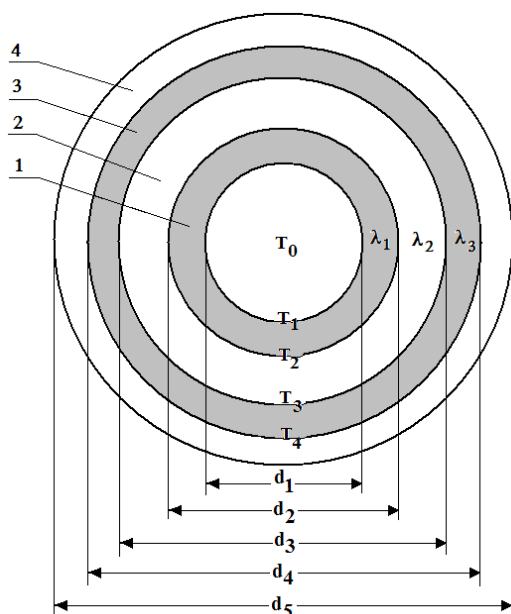
Решено е уравнението на топлопроводност в случаите на естествена конвекция и са предложени явни аналитични формули, описващи разпределението на температурата на газа  $T_g(r)$  в новите условия.

Извършена е оценка на по-рано съществуващо решение, описващо разпределението на  $T_g$  при допускането  $q_v = \text{const}$  . Установено е, че при подобно допускане, относителната грешка при определяне на  $T_g(r)$  в центъра на тръбата е в рамките на 5.6%.

Направено е сравнение на получените температурни профили  $T_g(r)$  при и  $q_v = q_v(r)$ . Установено е, че в центъра на тръбата температурата при  $q_v = q_v(r)$  не може да бъде по-висока с повече от  $100^\circ\text{C}$ . Прието е, че тази по-висока температура може да окаже съществено влияние на поведението на лазерната тръба и е направена препоръка за използването на новите формули за определяне на  $T_g(r)$ .

## 2.5. Температурен профил на газа в He-SrBr<sub>2</sub> лазер [D9,114],[D10,115],[D11,116],[D12, 117].

Предмет на настоящия параграф е развитие на аналитичен модел за определяне на температурния профил на газа в активния лазерен обем, доразвиващ методиката на аналитичните модели в параграфи 2.3 и 2.4.



Фиг. 2.32. Напречно сечение на газоразрядната тръба на He-SrBr<sub>2</sub> лазер:  $d_1=19.8$  mm;  $d_2=25.5$  mm;  $d_3=40$  mm;  $d_4=46$  mm; 1 – керамична тръба от Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – свободно пространство, изпълнено с буферния газ хелий; 3 – кварцова тръба; 4 – изолация от ZrO<sub>2</sub>.

Изследват се два типа лазери, описани в [62, 63] и [64, 65]. Накратко ще се спрем на втория тип високомощен лазер с пари на SrBr<sub>2</sub>, описан в [64, 65]. Напречното сечение на активния обем е илюстрирано на Фиг. 2.32. Общата дължина на лазерната тръба е 2.30 m, а дължината на активния обем (разстоянието между електродите) е 98 cm. Лазерът консумира обща електрическа мощност 2.1 KW. С отчитането на загубите, в активния обем се подава електрическа мощност  $Q=1365$  W, или средна обемна плътност на мощността  $q_v=4.55\text{W}/\text{cm}^3$ . Общата изходна лазерна мощност е 4 W, като 90% от нея е линията 6.45  $\mu\text{m}$ .

Поради особеността на конструкцията на лазерната тръба (Фиг. 2.32), граничните условия се различават съществено от тези на разглежданите досега лазери. По тази причина на тях ще се спрем по-подробно.

А. Приемаме, че температурата  $T_4$  под изолацията от ZrO<sub>2</sub> е известна. Тя може да бъде измерена коректно с термодвойка.

Б. За кварцовата тръба (цилиндрична конфигурация) е в сила вече използваното в предишните параграфи равенство:

$$T_3 = T_4 + \frac{q_l \ln(d_4/d_3)}{2\pi\lambda_3} \quad (2.49)$$

В. Пространството в между двете тръби, Фиг. 2.32, позиция 2, е изпълнено с хелий. Граничното условие има вида [159]:

$$Q = \varepsilon_{eff} c \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] S_2 + \frac{2\pi\lambda_2 l}{\ln(d_3/d_2)} (T_2 - T_3) + \frac{2\pi\lambda_{eff} l}{\ln(d_3/d_2)} (T_2 - T_3), \quad (2.50)$$

или ако означим трите събираеми съответно с  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ :  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ , където:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{S_2}{S_3} + \frac{1}{F_{23}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}}; \quad \lambda_{eff} = 0.386\lambda_2 \left( \frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{1/4} (Ra_{cyl}^*)^{1/4};$$

$$(Ra_{cyl}^*)^{1/4} = \frac{\ln(d_3/d_2)}{\delta^{3/4} (d_2^{-3/5} + d_3^{-3/5})^{5/4}} Ra_{\delta}^{1/4}; \quad Ra_{\delta} = \frac{g\beta(T_2 - T_3)\delta^3}{\nu^2} \text{Pr}; \quad \delta = 0.5(d_3 - d_2).$$

Г. За керамичната тръба е в сила равенството:

$$T_1 = T_2 + \frac{q_l \ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_1} \quad (2.51)$$

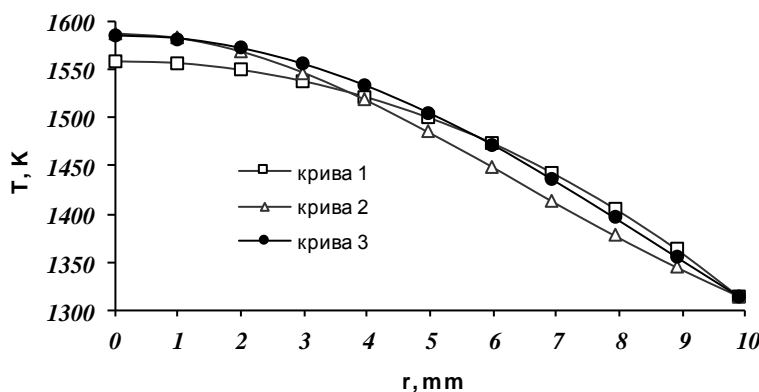
Приетите означения са както следва: Величината  $Q = 795\text{W}$  е топлинният поток, равен на консумираната електрическа мощност, съгласно допускане 3;  $q_l = Q/l_a$ ,  $l_a = 0.705\text{ m}$  - активна дължина;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  са съответно коефициентите на топлопроводност на тръбата от  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , на кварцовата тръба и топлинната изолация;  $d_j$ ,  $j=1,2,3,4$  са диаметрите на съставлящите тръби;  $c = 5.67\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  - излъчвателен коефициент. Величината  $\varepsilon_{eff}$  е ефективен излъчвателен коефициент, отчитащ многократните отражения в пространството между двете тръби (2), фиг. 2.32,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  са респективно интегралните излъчвателни константи на керамичната и кварцова тръби,  $\varepsilon_1 = 0.52$  и  $\varepsilon_2 = 0.72$ .  $S_2 = \pi l_a d_2$  и  $S_3 = \pi l_a d_3$  са околни повърхнини. Величината  $F_{23}$  е геометричен фактор, чиято стойност се определя от отношенията  $r_2/r_3$ ,  $l_a/r_2$  и е  $F_{23} = 0.6$  [159].

В гранично условие (2.50) величината  $Q_1$  представлява закона на Стефан-Болцман и описва топлинното излъчване на керамичната тръба в затвореното пространство (2), Фиг. 2.32,  $Q_2$  престава за закона на Нютон –Риман и описва процеса топлопроводност. Величината  $Q_3$  описва свободната конвекция в затвореното пространство (2), Фиг. 2.32. По този начин гранично условие (2.50) отчита всички възможни процеси на топлопренасяне: излъчване, топлопроводност и свободна конвекция.

Разгледани са отново 3 типа разпределения по радиуса на обемната плътност на мощността от типа на Фиг. 2.10. Получените решения за радиалното разпределение на температурата са от типа (2.26) и (2.27).

За решаване на уравнение (2.1) е зададена температурата  $T_4 = 1200\text{ K}$  на кварцовата тръба (под изолацията).

На следващата Фиг. 2.34 е показано разпределението на  $T_g(r)$  за кривите 1, 2 и 3 в напречното сечение на тръбата.



Фиг. 2.34. Разпределение на температурата в напречното сечение на тръбата на  $\text{SrBr}_2$  лазер:

□ - крива 1:  $q_v(r) = q_0 = \text{const}$ ;

△ - крива 2:

$$q_{2,v}(r) = K_1 q_0 (a + br^2);$$

● - крива 3:

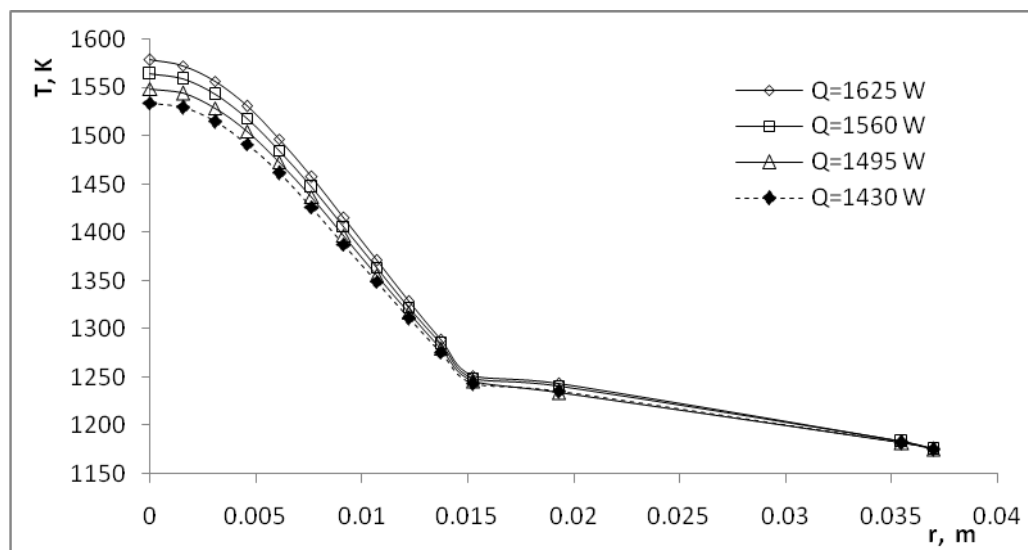
$$q_{3,v}(r) = K_2 q_0 (n + pr^2 + sr^3)$$

Резултатите показват, че получените стойности на температурите в лазерния обем са сравнително близки, особено между криви 2 и 3. При тях относителната грешка не превишава 0.1%. Малко по-големи са отклоненията при крива 1. По сравнение с другите резултати от параграфи 2.4 и 2.5, относителната грешка е в рамките на 2 %. От тук следва, че при избрания температурен модел с гранични условия, описани в параграф 2.5.3, на практика може да се използва което и да е от получените решения, илюстрирани на Фиг. 2.34. Причината за това по наше мнение са активните процеси на охлаждане и малкия напречен размер на активния обем, при което при една и съща подавана електрическа мощност разпределението на обемната плътност на мощността няма съществено влияние в разпределение на температурата.

Разпределението на топлопренасяната топлинна мощност по процеси в гранично уравнение (2.50) е следният: При обща подадена електрическа мощност в активната среда  $Q=1365\text{ W}$  на излъчването се падат  $Q_1 = 978\text{ W}$  или 72 %, на топлопроводността  $Q_2=384\text{ W}$  или 28 %. На свободната конвекция се падат едва  $Q_3= 3\text{ W}$ . Тук отново, както и в параграф 2.5.5 в затворено пространство при малки разстояния между тръбите ( $\delta=0.5(d_3-d_2)=7.25\text{ mm}$ ) и ниска плътност на газа ( $p_{He}=45\text{ Torr}$ ) възникването на значими конвекционални газови потоци е невъзможно.

Направена е демонстрация на възможностите на развитите температурни модели за провеждане на някои предварителни изчисления, свързани с възможни инженерни решения. За целта са проведени компютърни симулации, като са разгледани различни стойности на външната температура  $T_4$ , за различни подавани електрически мощности в газовия разряд, а също така и за различни типове изолации на газовата тръба.

На Фиг. 2.36 е показан пример за пресметнатото разпределение на температурата за 4 мощности:  $Q_{tot} = 2200\text{W}, 2300\text{W}, 2400\text{W}, 2500\text{W}$  и за  $T_4 = 1175\text{ K}$ .



Фиг. 2.36. Разпределение на температурата на газа за 4 мощности:  $Q_{tot} = 2200\text{W}, 2300\text{W}, 2400\text{W}, 2500\text{W}$  и за  $T_4 = 1175\text{ K}$ .

Подобни примерни компютърни симулации могат да бъдат провеждани само с развитите в настоящия параграф топлинни модели.

Направено е заключение от резултатите от параграф 2.6.

Развит е аналитичен модел за определяне на температурния профил на газа в активния обем на лазерна тръба, който отчита неравномерното разпределение на електрическата мощност по сечението на лазерната тръба.

Разгледани са случаи на качествено разпределение на обемната плътност на електрическата мощност  $q_v = q_v(r)$  по сечението на лазерната тръба в зависимост от радиуса.

Разгледани са смесени гранични условия при решаване на уравнението на топлопроводност. В частност, в газовото пространство между двете тръби количествено са оценени трите възможни процеса на топлопредаване: излъчване, топлопроводност и свободна конвекция.

Установено е, че основен процес е излъчването (около 70 %), на второ място е топлопроводността (30%). Свободната конвекция в затворено пространство е незначителна и може да се пренебрегне.

Решено е уравнението на топлопроводност и е предложена явна аналитична формула, описваща разпределението на температурата на газа  $T_g(r)$  в новите условия.

Извършена е оценка на по-рано съществуващо решение, описващо разпределението на  $T_g(r)$  при допускането  $q_v = \text{const}$ . Установено е, че при подобно допускане грешката при определяне на  $T_g(r)$  в центъра на тръбата за съществуващия лазер е в рамките на 2%.

## ГЛАВА 3. Статистическо изследване на лазер с пари на меден бромид, излъчващ във видимата област

### 3.1. Статистически методи и техники за изследване и развитие на лазери с пари на халогенидите

В началото на главата, параграф 3.1, е направен кратък обзор на използваните статистически методи и техника за изследване и развитие на лазери с пари на халогенидите.

### 3.2. Факторен анализ на изходна лазерната мощност $P_{out}$ на лазер с пари на меден бромид [D13-D16], [126-129]

За основа се използват данни от около 387 експеримента, получени през последните 30 години в Института по физика на твърдото тяло „Акад. Георги Наджакков”, БАН. За подобряване на разпределението на данните са направени случайни извадки, които по-нататък са послужили за основа на статистическите изследвания. Разгледани са 10 независими величини, които определят работата на CuBr лазер:  $D$  – вътрешен диаметър на лазерната тръба,  $DR$  – вътрешен диаметър на пръстените,  $L$  – разстояние между електродите (дължина на активната зона),  $Pin$  – входна мощност,  $PL$  – специфична мощност на единица дължина,  $Prf$  – честота на повторение на импулсите,  $Pne$  – налягане на неона,  $PH2$  – налягане на водорода,  $C$  – еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия,  $Tr$  – температура на резервоара с меден бромид.

Целта на анализа е да се определи тяхното влияние на  $P_{out}$  – лазерната генерация. Следвайки общите изисквания на факторния анализ, параграф 3.1, първоначално се изчислява корелационната матрица на стандартизираните данни и се определя корелацията между всеки две променливи. На Табл. 3.3 е показана получената корелационна матрица.

Табл. 3.3. Корелационна матрица за 10 независими величини и зависимата величина изходна лазерна мощност  $P_{out}$  за CuBr лазер<sup>(a)</sup>.

		$D$	$DR$	$L$	$Pin$	$PL$	$PH2$	$PRF$	$Pne$	$C$	$Tr$	$P_{out}$
Corr elati on	$D$	1.000	0.852	0.688	0.633	-0.559	0.257	-0.056	-0.244	0.396	0.082	0.655
	$DR$	0.852	1.000	0.904	0.849	-0.543	0.350	-0.134	-0.194	0.341	0.181	0.881
	$L$	0.688	0.904	1.000	0.858	-0.713	0.510	-0.168	-0.131	0.217	0.077	0.913
	$Pin$	0.633	0.849	0.858	1.000	-0.330	0.362	-0.143	-0.099	0.302	0.072	0.954
	$PL$	-0.559	-0.543	-0.713	-0.330	1.000	-0.444	-0.142	0.320	-0.190	0.004	-0.452
	$PH2$	0.257	0.350	0.510	0.362	-0.444	1.000	0.155	-0.062	-0.081	-0.281	0.451
	$PRF$	-0.056	-0.134	-0.168	-0.143	0.142	-0.155	1.000	0.491	-0.083	0.061	-0.184
	$Pne$	-0.244	-0.194	-0.131	-0.099	0.320	-0.062	0.491	1.000	-0.315	0.023	-0.137
	$C$	0.396	0.341	0.217	0.302	-0.190	-0.081	-0.083	-0.315	1.000	0.224	0.235
	$Tr$	0.082	0.181	0.077	0.072	0.004	-0.281	0.061	0.023	0.224	1.000	0.031
$P_{out}$	<b>0.655</b>	<b>0.881</b>	<b>0.913</b>	<b>0.954</b>	<b>-0.452</b>	<b>0.451</b>	-0.184	-0.137	0.235	0.031	1.000	

(a) Determinant = 4.96E-006

В реда на  $P_{out}$  се вижда, че за първите 6 променливи  $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $Pin$ ,  $PL$  и  $PH2$  корелационните коефициенти по модул със зависимата изходна  $P_{out}$  са по-големи от 0.3. Това означава, че тези

величина силно корелират с изходната лазерна мощност и помежду си. Последните четири променливи имат много слаба корелация с  $P_{out}$  и с първите шест (под 0.3 по абсолютна стойност). Това позволява тези променливи да бъдат отстранени от анализа. По тази причина по-нататък в изследването ще се използват само първите 6 променливи  $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $Pin$ ,  $PL$  и  $PH2$ .

Извличането на факторите е проведено по метода на главните елементи (Principal component analysis) и е проведено въртене по метода Варимакс. Резултатите са представени на Табл. 3.6.

Табл. 3.6. Класифициране на 6 значими величини по фактори.

<b>Rotated Component Matrix (a)</b>			
	Component		
	1	2	3
<i>Pin</i>	0.942		
<i>DR</i>	0.905		
<i>L</i>	0.789		
<i>D</i>	0.744		
<i>PL</i>		-0.913	
<i>PH2</i>			0.943

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

(a) Rotation converged in 5 iterations.

Получените резултати от факторния анализ показват, че от 9 реални физически независими променливи 6 от тях имат съществено влияние на изходната лазерна мощност. По степента на тяхното влияние това са величините  $Pin$ ,  $DR$ ,  $L$ ,  $D$  и  $PH2$ . Четири от разглежданите величини имат несъществено влияние на лазерната генерация. Това са променливите  $PRF$ ,  $PNE$ ,  $C$  и  $Tg$ . Това означава, че в бъдещи експерименти тези величини могат да не бъдат предмет на изследване. В процеса на експерименталните изследвания за всяка една от тях е получен интервал от стойности, който е оптимален за лазерната генерация. Ако в бъдещи експерименти тези величини заемат стойности във вече установените интервали, изменението на лазерната мощност ще бъде несъществено. Това позволява значително да се намалят експерименталните изследвания, да се повиши ефективността на инженерното проектиране.

Значимите величини са групирани в 3 фактора. Тук само ще напомним, че групирани величини в даден фактор имат силна корелация помежду си. Отделните фактори са линейно независими, т.е. между величините в различните фактори има слаба корелация или такава липсва. Наличието на силна корелация между величините в даден фактор позволява и изисква те да бъдат променяни *едновременно*. Реалните независими физически величини могат да бъдат заменени с фиктивни такива - факторни величини. Така в конкретния случай 9-те реални независими физически величини могат да бъдат заменени с 3 фиктивни факторни величини. По този начин размерността на задачата се намалява многократно. Това дава възможност да се промени коренно подходът при провеждане на експерименталните изследвания, като се намали значително времето и средствата за експерименталните изследвания и повиши ефективността на експерименталния труд.

Приведените резултати са получени за първи път в областта на лазерите с пари на металите и техните съединения и са изцяло оригинални. Подобни резултати не могат да бъдат установени с помощта на експериментални или други теоретични изследвания. Ще отбележим, че те са базирани на конкретните данни за разглежданите лазери, но като методика са напълно приложими за близки по тип изследвания при наличие на данни.

Една от особеностите на факторния анализ (и не само на факторния) е това, че той не дава формално обяснение за физическата причина за получените резултати. По този начин като следваща стъпка е необходимостта от интерпретация на тези резултати. Трябва да отбележим, че тази интерпретация не е еднозначна. Тя показва конкретните виждания на изследователя, извършващ физическия анализ.

Най-силно е влиянието на входната електрическа мощност. Нейното увеличаване в определени граници повишава енергията на електроните и това довежда до повишаване на заселването на горните лазерни нива. Инверсната населеност нараства и с това расте и лазерната генерация. Повишаване на подаваната електрическа мощност има своите физически граници. При високи стойности нараства плътността на тока, повишава се температурата на газа. Появява се термийонизационна и електройонизационна нестабилност на газовия разряд. Засилва се термохимичната деградация на активното вещество, разрушават се електродите и с това се замърсява лазерната среда. Активно се заселва долното лазерно ниво, като горното лазерно ниво се разселва за сметка на повишената плътност на тока и еластичните удари от първи род. Това довежда в крайна сметка до намаляване на лазерната генерация и влошаване на качеството на лазерния лъч.

Втора по влияние на лазерната генерация се явява величината  $dg$ , наличието на вътрешни пръстени в лазерната тръба. Те повишават вътрешната повърхнина на лазерната тръба и с това подобряват нейното охлаждане и топлинния баланс. Повишава се дифузията и дрейфът на заредените и метастабилни частици и тяхната рекомбинация и гасене на стените на тръбата. Това довежда до повишаване на загубите и увеличаване на приложеното напрежение на електродите. Повишава се възстановяването на медния бромид е лазерния обем.

Повишаване на величините  $L$  и  $D$  е свързано с повишаване на външната повърхнина и обема на лазерната тръба. С увеличаването на  $D$  се увеличава коефициентът на топлопредаване на тръбата с околната среда (Критерий на Грасхоф:  $Gr \sim D^3$ ). Това подобрява топлинния баланс на лазерната тръба и намалява топлинната населеност на долните лазерни нива.

Относителната електрическа мощност на единица обем намалява. Това подобрява температурния профил в газовия разряд. Известно е също така, че лазерното усилване зависи експоненциално от дължината на активната част ( $\sim e^{\alpha L}$ ). Тук трябва да добавим, че това усилване може да бъде ограничено от процеса на насищане.

Предмет на разглеждане е и една относителна величина- подаваната електрическа мощност на единица дължина ( $PL = Pin/L$ ). Тази величина има отрицателна стойност. Това означава, че с повишаване на  $PL$  лазерната мощност намалява. Това може да има и практическо приложение. Както вече бе установено, за повишаване на лазерната генерация е необходимо нарастването на  $Pin$  и  $L$ . Величината  $PL$  показва, че дължината на тръбата трябва да нараства с по-голяма степен от  $Pin$ , така, че  $PL$  да е намаляваща функция.

В третият фактор се намира величината  $P_{H2}$ -налягане на водорода. Влиянието на водорода на лазерната генерация отдавна е установена експериментално [180, 156]. Тази величина е независима от другите величини и позволява нейното самостоятелно експериментално изследване.

### 3.3. Клъстерен анализ на изходната лазерната мощност [D17,D15], [130,128]

Обект на изследване са същите 10 независими величини, както и при факторния анализ. За разлика от факторния анализ, класификацията на обектите в клъстерния анализ се извършва на основата на критерии за близост, хомогенност. Също така трябва да отбележим, че за разлика от факторния анализ, в клъстерния анализ няма специални изисквания към данните. Предварително данните се стандартизират (обезмеряват). Формирането на групите (клъстерите) по зададен критерий се извършва чрез обединяване на еднородни обекти, а самите клъстери трябва да останат нееднородни помежду си.

Проведеният в параграф 3.2 факторен анализ показва, че 6 независими променливи ( $Pin, DR, L, D, PL$  и  $PH2$ ), които имат съществено влияние на изходната лазерна мощност, са групирани в 3 фактора, Табл. 3.6. Целта е да се проведе частичен клъстерен анализ и да се групират тези величини по клъстери, получените резултати да се сравнят с резултатите от факторния анализ.

За извършване на клъстерния анализ е използвана 25% случайна извадка от всичките използвани данни за  $CuVg$  лазер.

В Табл. 3.9 е показано разпределението на шестте величини в три клъстера по метода на междугруповото свързване и квадрат на евклидово разстояние. В първия клъстер влизат

променливите  $D$ ,  $DR$ ,  $L$  и  $Pin$ . Във втория -  $PL$ , а в третия -  $PH2$ . По този начин получаваме пълно съответствие с резултатите от факторния анализ, Табл. 3.6.

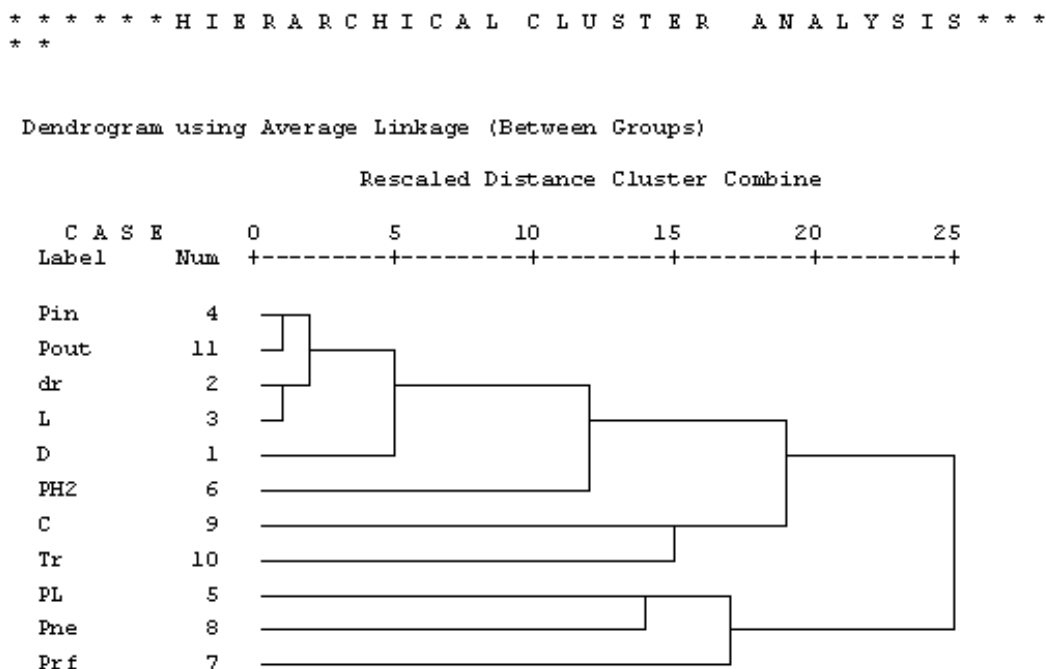
Табл. 3.9. Принадлежност на шестте променливи към три клъстера по метода на междугруповото свързване.

Променлива	Клъстери
$D$	1
$dr$	1
$L$	1
$Pin$	1
$PL$	2
$PH2$	3

Следващият етап в клъстерния анализ е да се определи мястото на зависимата величина  $P_{out}$  сред десетте независими величини. За тази цел е построена дендрограмата на Фиг. 3.7, като  $P_{out}$  е под номер 11. От Фиг. 3.7 се вижда, че  $P_{out}$  влиза в първия клъстер заедно с променливите  $Pin$ ,  $dr$ ,  $L$ , и  $PH2$ . Това потвърждава същественото влияние на тези величини на величината  $P_{out}$ .

Ако сравним резултатите, получени от факторния и клъстерния анализ, ще получим, че на зависимата величина  $P_{out}$  съществено значение оказват 5 реални физически променливи - това са  $Pin$ ,  $L$ ,  $dr$ ,  $D$  и  $PH2$ . Получените резултати потвърждават валидността както на клъстерния анализ, така и на факторния анализ и позволяват в конкретния случай да се сложи знак за съвпадение на понятието „близост” от клъстерния анализ с понятието „корелация” от факторния анализ.

Физическият анализ и интерпретацията на получените резултати от параграф 3.2.4 е актуален и в този случай.



Фиг. 3.7. Дендрограма на десетте независими величини и  $P_{out}$ .



### 3.4. Факторен анализ на лазерната ефективност Eff [D18-D20], [131-133]

Предмет на изследване в този параграф е лазерната ефективност на CuVg лазер. Задачите, които трябва да се решат не се различават от тези, отнасящи се за изходната лазерна мощност, а именно: 1) определяне на входните лазерни параметри, които влияят на ефективността; 2) класификация на параметрите чрез групиране на тези от тях, които корелират силно помежду си и не корелират с останалите; 3) физическа интерпретация на получените резултати.

По методиката от параграф 3.2 е построена корелационната матрица (Табл. 3.15), като за зависима величина е лазерната ефективност Eff. Тя служи да показва корелацията както между 10-те независими величини, така и на всяка една от тях със зависимата величина Eff.

Табл. 3.15. Корелационна матрица<sup>a</sup> за 10 независими величини и зависимата величина лазерна ефективност Eff.

	D	dr	L	Pin	PL	PH2	PRF	Pne	C	Pout	Tr	Eff	
Correlation	D	1.000	0.847	0.693	0.636	-0.573	0.279	-0.055	-0.238	0.386	0.638	0.080	0.604
	dr	0.847	1.000	0.899	0.847	-0.549	0.352	-0.131	-0.189	0.333	0.861	0.177	0.761
	L	0.693	0.899	1.000	0.861	-0.716	0.503	-0.165	-0.128	0.212	0.895	0.076	0.836
	Pin	0.636	0.847	0.861	1.000	-0.343	0.359	-0.140	-0.097	0.295	0.934	0.070	0.700
	PL	-0.573	-0.549	-0.716	-0.343	1.000	-0.452	0.139	0.314	-0.186	-0.444	0.004	-0.648
	PH2	0.279	0.352	0.503	0.359	-0.452	1.000	-0.148	-0.059	-0.078	0.429	-0.267	0.561
	PRF	-0.055	-0.131	-0.165	-0.140	0.139	-0.148	1.000	0.491	-0.083	-0.184	0.061	-0.245
	Pne	-0.238	-0.189	-0.128	-0.097	0.314	-0.059	0.491	1.000	-0.315	-0.137	0.023	-0.273
	C	0.386	0.333	0.212	0.295	-0.186	-0.078	-0.083	-0.315	1.000	0.235	0.224	0.168
	Pout	0.638	0.861	0.895	0.934	-0.444	0.429	-0.184	-0.137	0.235	1.000	0.031	0.829
	Tr	0.080	0.177	0.076	0.070	0.004	-0.267	0.061	0.023	0.224	0.031	1.000	-0.132
Eff	<b>0.604</b>	<b>0.761</b>	<b>0.836</b>	<b>0.700</b>	<b>-0.648</b>	<b>0.561</b>	-0.245	-0.273	0.168	<b>0.829</b>	-0.132	1.000	

a Determinant = 2.48E-006

Следвайки отново процедурите на факторния анализ, можем да отбележим, че корелационните коефициенти на променливите Prf, Pne, C и Tr имат собствени стойности по модул под 0,3 т.е. между всяка от тях и ефективността няма корелационна зависимост. Също така и коефициентите им спрямо всички останали променливи са по абсолютна стойност под 0,5 т.е. показват слаба корелация. Съответно четирите променливи имат и някои неприемливи нива на значимост. По-нататък променливите Prf, Pne, C и Tr няма да се включват в статистическите разглеждания. Така във факторния (и регресионния) анализ ще вземат участие само променливите D, dr, L, Pin, PL и PH2. Те имат корелационни коефициенти с Eff, съответно: 0.604; 0.761; 0.836; 0.700; - 0.648 и 0.561.

За класифициране на шестте значими зависими величини е извършено въртене на факторите с метода Varimax. Получените резултати са представени на Табл. 3.17. Върху първия фактор най-силно влияние оказват променливите Pin, dr, L и D със съответни тегла 0.946, 0.902, 0.790 и 0.728. Вторият фактор се описва от променливата PL с тегло -0.909, а в третия фактор преобладава PH2 с тегло 0.944. Ще добавим, че сме провели въртене на факторите с всичките седем налични метода в SPSS и получихме същия тип резултати. В Табл. 3.17 са отстранени всички факторни тегла по 0.5 (празни полета) [67]. Бе проведен и пост-анализ чрез репродуцираните корелации и други оценки на грешката на факторния анализ.

Накрая се изчисляват факторните стойности, които се използват в следващи анализи.

Съгласно получените резултати участващите 6 величини са систематизирани в 3 групи (фактора) - табл. 3.17. В първата група (фактор F1) влизат величините D, dr, L, Pin. Този фактор няма ясно изразен физически смисъл и има смесена размерност. Във втората и третата група (фактори F2 и F3) влизат респективно величините PL и PH2.

Табл. 3.17. Класифициране на 6 основни значими величини по фактори.

**Rotated Component Matrix (a)**

	Component (фактор)		
	F1	F2	F3
Pin	0.946		
dr	0.902		
L	0.790		
D	0.728		
PL		-0.909	
PH2			0.944

(a) Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

A Rotation converged in 5 iterations.

### 3.4.3. Анализ и интерпретация на получените резултати от факторния анализ

Резултатите от факторния анализ от параграф 3.2 и 3.4 показаха, че лазерната мощност  $P_{out}$  и лазерната ефективност  $Eff$  на CuBr лазер зависят непосредствено от 6 независими величини -  $Pin$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $D$ ,  $PL$  и  $PH2$ . Порядъкът на въздействие на тези величини на  $P_{out}$  и  $Eff$  е различен. Съгласно корелационната матрица, Табл 3.15, влиянието на 6 значими величини на  $Eff$  в низходящ ред е следният:  $L$ ,  $dr$ ,  $Pin$ ,  $PL$ ,  $D$  и  $PH2$ . За величината  $P_{out}$  подреждането на същите величини в низходящ ред е  $Pin$ ,  $L$ ,  $dr$ ,  $D$ ,  $PL$  и  $PH2$ . Тези резултати показват дълбокото различие във физическата същност на тези две величини и различните процеси при тяхното повишаване.

Най-силно е влиянието на лазерната ефективност на геометричните характеристики -  $L$ ,  $dr$ ,  $D$  и едва след това на  $Pin$ . Ефективността се определя от оптималните показатели на газовия разряд- оптимално значение на надлъжното и напречно електрично поле  $\left(E_1 = \frac{U_1}{L}; E_2 = \frac{U_2}{D}\right)$ , оптимална стойност на температурата на неутралния газ, което предполага оптимална стойност на обемната плътност на подаваната електрическа мощност  $\left(q_v = \frac{P_{el}}{V}\right)$ . Както се вижда, навсякъде се явяват геометрични характеристики на лазерната тръба. Тъй като лазерните източници не са предмет на масово производство, величината лазерна ефективност като че ли е подценявана при разработването на нови такива. Трябва да отбележим, че тази величина оказва съществено влияние на други две важни изходни характеристики на лазерното изделие - физически срок на служба на лазерната тръба и спад на лазерната генерация във времето. Лазерна тръба, която е конструирана да работи в режим на максимална ефективност, живее по-дълго и дава стабилна лазерна генерация по-дълго време.

По отношение на лазерната ефективност от всички геометрични параметри на лазерната тръба на преден план и в двата разглеждани случая се очертава величината  $L$ . По тази причина на нея ще се спрем отделно. Добре е известно [157], че с увеличаване на дължината на тръбата и разстоянието между електродите става преразпределение на приложената електрическа мощност. Намалява относителният дял на електричните загуби върху електродите и се увеличава мощността, приложена непосредствено в газовия разряд. Това увеличава и лазерната мощност и лазерната ефективност. Всичко това налага още един извод. Ако искате нов лазерен източник с по-висока лазерна мощност и ефективност, проектирайте лазерна тръба с по-голяма дължина. Този извод не е в полза на ЛПМ по отношение на тяхната компактност, но явно такива са физичните реалности и с тях трябва да се съобразяваме, на база на наличите експериментални изследвани данни.

### 3.5. Регресионен анализ за лазерната мощност и ефективност. Линейни полиномни модели [D13-D15, D19, D22], [126, 127, 129, 133, 134]

Предмет на изследване отново ще бъдат 10 независими величини от предишните параграфи.

Бе установено с помощта на факторния анализ, че от 10-те величини 6 оказват съществено влияние на изходните лазерни параметри лазерна мощност  $P_{out}$  и лазерна ефективност  $Eff$ . Тези величини бяха групирани в три фактора, Табл. 3.6. Факторният анализ не може да отговори на въпроса кои от тези три фактора и в каква степен имат съществено значение в поведението на разглежданите независими изходни лазерни величини.

Многомерният регресионен анализ се прилага в различни варианти, от които в случая ще използваме Регресия с главните елементи (РГЕ) - (Principal Component Analysis). Тази регресия може да се използва, когато изходните променливи са мултиколинеарни. Вариант на метода на регресия с главните елементи е съчетаването му с ФА. По-точно, провежда се ФА с извличане на факторите по метода на главните елементи. Получените фактори са ортогонални помежду си и групират колинеарните променливи. От своя страна, извлечените фактори (по-точно факторните променливи) се използват по-нататък като нови, линейно независими помежду си предиктори (независими променливи) за провеждане на други анализи и в частност – регресионен анализ.

За тази цел ще търсим стандартизирани регресионни уравнения от вида:

$$\hat{P}_{out} = \beta_{P1}F_1 + \beta_{P2}F_2 + \beta_{P3}F_3; \quad (3.12)$$

$$\hat{E}ff = \beta_{E1}F_1 + \beta_{E2}F_2 + \beta_{E3}F_3.$$

Стойностите на стандартизираните коефициенти  $\beta_{P1}$ ,  $\beta_{P2}$ ,  $\beta_{P3}$ ,  $\beta_{E1}$ ,  $\beta_{E2}$  и  $\beta_{E3}$  ще определят относителната тежест на всеки един от факторите, а с това и относителната тежест на величините, които влизат в съответния фактор.

В следващите Табл. 3.18 и Табл. 3.19 са сравнени стандартизираните коефициенти за изходната лазерна мощност  $P_{out}$  и лазерна ефективност  $Eff$  по общите регресионни уравнения (3.12), получени с помощта на процедурите на регресионния анализ. Пресмятанията са направени с различен на брой извадков материал, а също така са използвани и различни методи: линейна регресия, стъпкова регресия, обратно стъпкова регресия, регресия с главните елементи.

Табл. 3.18. Стандартизирани коефициенти за  $P_{out}$ .

Литература	$P_{out}$		
	$\beta_{P1}$	$\beta_{P2}$	$\beta_{P3}$
[129]	0.886	0.095	0.368
[127]	0.894	0.137	0.317
[126]	0.913	0.118	0.305

Табл. 3.19. Стандартизирани коефициенти за  $Eff$ .

Литература	$Eff$		
	$\beta_{E1}$	$\beta_{E2}$	$\beta_{E3}$
[126]	0.609	0.361	0.403
[133]	0.623	0.404	0.414

Анализът на получените резултати показва, че първият фактор (а това означава и величините  $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $P_{in}$ , включени в него) има преобладаваща тежест в поведението на изходните величини  $P_{out}$  и  $Eff$ . На второ място по значимост се нарежда третият фактор с величината  $RH2$ . Тук също така трябва да отбележим устойчивост на получените резултати. Те не зависят съществено от направената случайна извадка и използваните методи в регресионния анализ. Отново, както в параграф 3.2.3, поставената задача има само едно решение. Факторните величини участват само с първите си степени. Няма независими променливи от втора или трета степен като комбинации от първоначалните променливи (например:  $F_1 \cdot F_2$ ,  $F_1^2$ ,  $F_2^3$  и т.н.). Всяко едно линейно уравнение обикновено има само едно решение. Към този резултат ще се върнем отново, когато разглеждаме нелинейни регресионни модели от втора и трета степен.

### 3.5.1. Линеен регресионен модел №1 за изходната лазерна мощност на CuBr лазер

Получените резултати показват, че единствено възможен линеен параметричен регресионен модел е този с независими факторни величини от проведения ФА. Да припомним още веднъж, че съгласно изискванията на ФА независимите реални физични величини се групират, като във всеки фактор те трябва силно да корелират по между си и слабо да корелират с величините, групирани в други фактори. По този начин получаваме нови независими величини (фактори), които са независими и ортогонални по между си и могат да се използват за построяване на регресионни модели и уравнения. Регресионното уравнение го търсим във вида:

$$P_{out} \approx B_1 F_1 + B_2 F_2 + B_3 F_3 + B_0. \quad (3.14)$$

В основата на изследванията в този параграф е публикация [129], с използване на случайна извадка от 300 експериментални резултати.

Проведеният регресионен анализ позволява да получим нестандартизираното уравнение:

$$P_{out} \approx 28.639 + 26.363F_1 + 2.822F_2 + 10.947F_3. \quad (3.15)$$

Съответните стандартизирани коефициенти  $\beta_{P1}, \beta_{P2}, \beta_{P3}$  са показани на първия ред на Табл. 3.18. Моделът (3.15) има коефициент на детерминация  $R^2=0.92$ , като факторният модел описва 93.1% от изследваните данни. За няколко избрани комбинации прогнозните резултати от модела (3.15) са показани в Табл. 3.21.

Табл. 3.21. Прогнозирани резултати за изходната лазерна мощност  $P_{out}$  за един реален експеримент  $v_0$  и 15 варианта за предсказани експерименти. Последната колона  $P_{outPr}$  показва приблизителните прогнозни стойности.

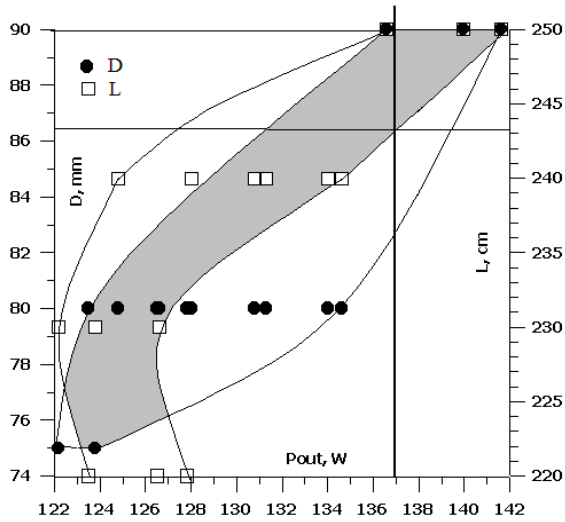
Примери за прогнозиране														
	$D$	$dr$	$L$	$Pin$	$PL$	$PH2$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$P_{outPr}$
$v_0$	58	58	200	5.0	12.50	0.5	2.955	-1.777	0.489	28.639	26.363	2.822	10.947	109.892
$v_1$	75	72	230	5.1	11.09	0.6	3.199	-1.021	0.625	29.547	27.461	2.390	11.563	122.183
$v_2$	80	68	220	5.2	11.82	0.6	3.282	-1.225	0.567	29.560	27.461	2.244	11.619	123.525
$v_3$	75	72	230	5.2	11.30	0.6	3.249	-1.128	0.651	29.563	27.506	2.345	11.583	123.826
$v_4$	80	78	240	5.0	10.42	0.6	3.340	-0.675	0.424	29.572	27.544	2.500	11.534	124.767
$v_5$	80	75	220	5.2	11.82	0.6	3.399	-1.216	0.515	29.589	27.554	2.258	11.633	126.502
$v_6$	80	75	230	5.2	11.30	0.6	3.394	-1.046	0.505	29.590	27.575	2.337	11.598	126.578
$v_7$	80	78	220	5.2	11.82	0.6	3.449	-1.214	0.494	29.602	27.595	2.265	11.639	127.789
$v_8$	80	78	240	5.2	11.83	0.6	3.440	-0.890	0.478	29.604	27.639	2.417	11.570	128.050
$v_9$	80	75	240	5.2	10.83	0.7	3.255	-1.023	1.173	29.631	27.563	2.439	11.927	130.840
$v_{10}$	80	78	240	5.4	11.25	0.6	3.537	-1.104	0.531	29.636	27.737	2.328	11.606	131.326
$v_{11}$	80	75	240	5.4	11.25	0.7	3.350	-1.235	1.228	29.663	27.655	2.349	11.982	134.119
$v_{12}$	80	78	240	5.6	11.67	0.6	3.630	-1.313	0.585	29.668	27.837	2.234	11.641	134.578
$v_{13}$	90	88	250	5.0	10.00	0.7	3.568	-0.528	0.781	29.688	27.767	2.632	11.880	136.638
$v_{14}$	90	88	250	5.2	10.40	0.7	3.664	-0.746	0.842	29.720	27.868	2.561	11.921	139.965
$v_{15}$	90	88	250	5.3	10.60	0.7	3.711	-0.853	0.872	29.736	27.920	2.524	11.941	141.612

В първия ред  $v_0$  е прогнозирането на реален експериментален резултат на максималната лазерна мощност  $P_{out} = 120W$  [156]. Регресионният модел дава прогнозна стойност от 109.892W, като относителната грешка е 8,4%. Числените експерименти в Табл. 3.21 показват максимална прогнозирана мощност от 141.6W, която е с 18 % по-голяма от експериментално установената максимална мощност от 120W. Получените резултати позволяват да се построят някои номограми, които могат лесно да бъдат използвани в бъдещи експерименти, за конструиране на нови лазерни източници, Фиг. 3.10 a,b,c.

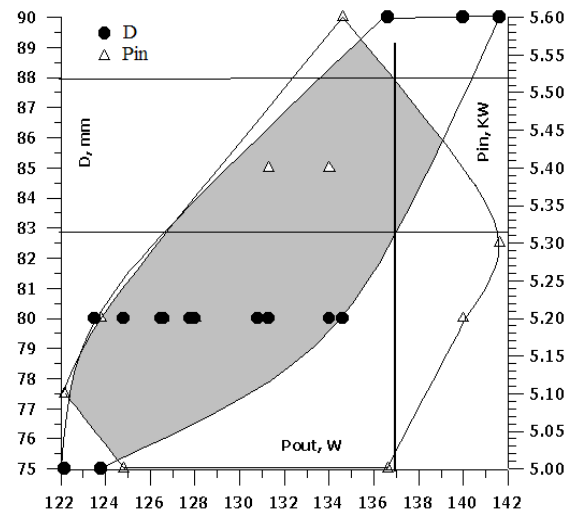
За демонстриране на приложените номограми ще определим интервалните стойности на величините  $D, L$  и  $Pin$  за получаване на нова изходна лазерна мощност  $P_{out} = 137W$ . За тази цел

построяваме вертикална линия на всяка едно от номограмите със стойност по абсисата  $P_{out} = 137W$ . По този начин получаваме в потъмнените части ограниченията:

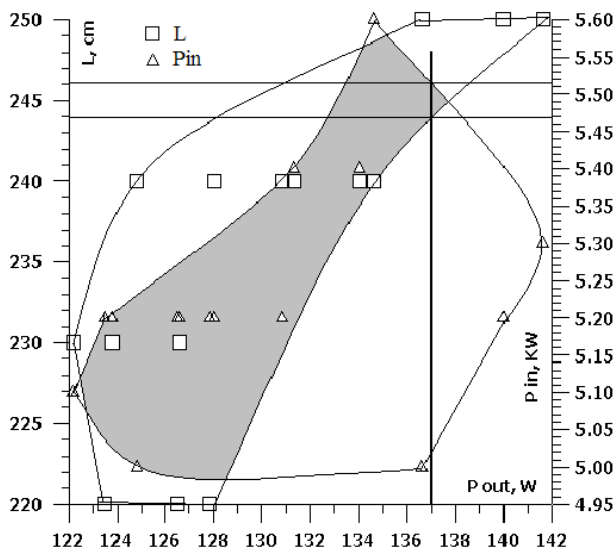
$$D_1(86.5,90) \cap L_1(243,250), \quad D_2(83,88) \cap Pin_1(5.31,5.52), \quad L_2(24,246) \cap Pin_2(5.47,5.52)$$



Фиг. 3.10 а



Фиг. 3.10 б



Фиг. 3.10 с

Фиг. 3.10. Зависимост на прогнозираната изходна лазерна мощност  $P_{out}$  за избрани стойности на входните параметри:  
а)  $D$  и  $L$ ; б)  $D$  и  $Pin$ ; в)  $L$  и  $Pin$ .

Така, за всяка една от разглежданите величини получаваме следния прогнозен интервал, който предполага изходна лазерна мощност  $P_{out} = 137W$ :

$$D = D_1 \cap D_2 = (86.5, 88)$$

$$L = L_1 \cap L_2 = (243, 246)$$

$$Pin = Pin_1 \cap Pin_2 = (5.47, 5.52)$$

Анализът на получените резултати от ФА и РА показват [134], че точността в предсказване на изходната лазерна мощност е в рамките на 8 -12 %. Развитият линеен параметричен модел не може да бъде подобрен. Причините трябва да търсим в сложността на физическите процеси в лазерната тръба и най-вече в нелинейния характер на взаимодействие на независимите параметри с изходната лазерна мощност и ефективност. Повишаване на точността може да бъде постигнато например с развитието на нелинейни параметрични модели.

### 3.5.4.1. Квазинелинеен модел № 2 от втора степен за $P_{out}$ с 387 данни [D24], [138]

В този параграф ще бъдат търсени уравнения, в които участват 10-те независими величини в явен вид. Общият вид на търсената зависимост от втора степен е:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{out} = & a_0 + a_1D + a_2dr + a_3L + a_4Pin + a_5PL + a_6PH2 + a_7Prf \\ & + a_8Pne + a_9C + a_{10}Tr + a_{11}D.dr + a_{12}D.L + a_{13}D.Pin + a_{14}D.PL \\ & + a_{15}D.PH2 + a_{16}D.PRF + a_{17}D.Pne + a_{18}D.C + a_{19}D.Tr + a_{20}dr.L \\ & + a_{21}dr.Pin + a_{22}dr.PL + a_{23}dr.PH2 + a_{24}dr.PRF + a_{25}dr.Pne + a_{26}dr.C \\ & + a_{27}dr.Tr + a_{28}L.Pin + a_{29}L.PL + a_{30}L.PH2 + a_{31}L.PRF + a_{32}L.Pne \\ & + a_{33}L.C + a_{34}L.Tr + a_{35}Pin.PL + a_{36}Pin.PH2 + a_{37}Pin.PRF + a_{38}Pin.Pne \\ & + a_{39}Pin.C + a_{40}Pin.Tr + a_{41}PL.PH2 + a_{42}PL.PRF + a_{43}PL.Pne + a_{44}PL.C \\ & + a_{45}PL.Tr + a_{46}PH2.PRF + a_{47}PH2.Pne + a_{48}PH2.C + a_{49}PH2.Tr + a_{50}PRF.Pne \\ & + a_{51}PRF.C + a_{52}PRF.Tr + a_{53}Pne.C + a_{54}Pne.Tr + a_{55}C.Tr + a_{56}D^2 + a_{57}dr^2 \\ & + a_{58}L^2 + a_{59}Pin^2 + a_{60}PL^2 + a_{61}PH2^2 + a_{62}PRF^2 + a_{63}Pne^2 + a_{64}C^2 + a_{65}Tr^2 \end{aligned} \quad (3.22)$$

В (3.22) са включени всичките 10 независими физически величини като членове от първа степен и всички възможни комбинации от втора степен с повторение. Необходимо е да бъдат определени общо 66 неизвестни коефициенти  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{65}$ . От всички неизвестни коефициенти трябва да изберем само тези, които са статистически значими, в частност с ниво на значимост  $Sig. < 0.05$ . За тази цел в диалоговия прозорец на програмния продукт SPSS: Analyze/Regression/ Linear използваме постъпкова (Stepwise) регресия. Последната има това предимство, че следи за нивото на значимост на неизвестните коефициенти. Всеки един коефициент, за който не е изпълнено условието  $Sig. < 0.05$ , се отстранява от програмата и повече не участва в регресионния анализ. От всичко 66 неизвестни коефициента остават само 10 статистически значими на ниво 0.05, а именно:  $dr*Pin$ ,  $Pin*C$ ,  $Pin$ ,  $Pin^2$ ,  $L*PRF$ ,  $PRF*C$ ,  $D*PL$ ,  $dr*C$ ,  $D*PH2$  и  $C$ . От тези само две са линейни:  $Pin$  и  $C$ , всички останали са нелинейни. Използваният формален подход още веднъж потвърждава, че процесите в активния лазерен обем имат силно изразен нелинеен характер. Получаваме следното нестандартизирано уравнение за  $P_{out}$  (модел №2):

$$\begin{aligned} \hat{P}_{out} = & -18,313 + 0,686.dr.Pin - 7,658.Pin.C + 27,573.Pin^2 - 0,006.L.PRF \\ & - 0,006.L.PRF + 0,274.PRF.C - 0,030.D.PL - 0,612.dr.C + 0,258.D.PH2 + 18,090.C \end{aligned} \quad (3.23)$$

В уравнение (3.23) участват 8 независими величини:  $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $Pin$ ,  $PL$ ,  $PH2$ ,  $PRF$ ,  $C$ . Не участват само величините  $Tr$  и  $Pne$ . Моделът (3.23) има коефициент на детерминация  $R^2=0.93$ , т.е. описва 93% от данните. Съответното стандартизирано уравнение има следния вид:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{out} = & 1,793.dr.Pin + 0,984.Pin - 0,874.Pin^2 - 0,523.dr.C - 0,480.Pin.C \\ & + 0,312.C - 0,295.L.PRF + 0,215.PRF.C + 0,102.D.PH2 - 0,097.D.PL \end{aligned} \quad (3.24)$$

Коефициентите в уравнение (3.24) показват относителното влияние на всяка двойка физични величини на  $P_{out}$ . Знакът пред тях показва посоката на влияние върху  $P_{out}$  - за нейното намаляване или увеличаване спрямо съответните величини.

Направени са компютърни симулации на основата на уравнение (3.23) за известни експериментални резултати в областта на високите стойности на  $P_{out}$ . Средната относителна грешка е 5.74%.

Следващата стъпка е предсказване на нови стойности за  $P_{out}$ , които не са получени експериментално. Уравнение (3.23.) може да служи за прогнозиране и развитие на нови лазерни източници с по-висока изходна мощност.

Част от получените резултати са показани в Табл. 3.27. Вижда се, че двете величини  $C$  и  $PRF$  трябва да се променят в низходящ ред, за да получим повишаване на  $P_{out}$ . Избраното изменение на техните стойности е показано в колони 7 и 8.

Изменението на величините  $C$  и  $PRF$  в рамките на 10% може да доведе до изменение (в случая повишаване) на  $P_{out}$  в рамките на 20%. Това още веднъж показва силната зависимост на

$P_{out}$  от началните условия. Подобни заключения могат да бъдат направени само с развитието на нелинейното моделиране.

Табл. 3.27. Предсказани стойности на „предполагам експеримент“ за модел № 2 с уравнение (3.23)

D, mm	dr, mm	L, cm	Pin, kW	PL, W/cm	PH2, Torr	PRF, KHz	C, pF	PoutPre, W
1	2	3	4	5	6	7	8	9
58	58	205	5.1	12.43	0.6	16.0	1.30	111.7
60	58	210	5.2	12.38	0.6	15.5	1.28	113.6
62	60	215	5.3	12.32	0.65	15.0	1.25	122.6
65	62	220	5.4	12.27	0.65	14.8	1.20	131.9
70	68	225	5.4	12.00	0.7	14.0	1.18	151.8
72	70	230	5.35	11.63	0.7	13.5	1.15	159.1

### 3.5.4.3. Анализ на резултатите от развитите модели за изходната лазерна мощност $P_{out}$

Анализирането на нелинейното взаимодействие между независимите величини и тяхното влияние на изходната лазерна мощност  $P_{out}$  е сериозно предизвикателство. До този момент в съществуващите публикации подобен анализ отсъства. Винаги е било анализирано отделното влияние на всяка една съществена величина на  $P_{out}$ , но никога тяхното нелинейно влияние, т.е. влиянието по двойки независими величини на изходната лазерна мощност. Този въпрос остава открит и се очаква да е предмет на обсъждане и коментари, които ще продължат да бъдат извършвани и извън този труд. Тук ще фиксираме само някои по-обща закономерности, които първоначално се забелязват при анализа на резултатите.

А) Търсенето на нелинейно решение на поставената задача показва, че в същност е възможно съществуването на повече от едно решение, което напълно съвпада с общите положения от параграф 3.5.2. Всеки един от развитите модели може да описва поведението на лазерния източник при определени условия.

Б) В развития линеен модел № 1 (3.14) от глава 3, параграф 3.5.1 са определени като съществени 6 независими величини:  $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ,  $Pin$ ,  $PL$  и  $PH2$ . За останалите величини  $C$ ,  $PRF$ ,  $Pne$  и  $Tr$  е казано, че тяхното влияние е несъществено в рамките на експериментално определените интервали на изменение. По наше мнение полученото уравнение (3.14) може да бъде използвано за качествена оценка на лазерния източник при условие, че останалите величини са фиксирани и не се променят. Всяка една промяна на  $C$ ,  $PRF$ ,  $Pne$  и  $Tr$ , дори в експериментално установения интервал, предизвиква сложно нелинейно взаимодействие, което не може да бъде установено с линейния модел (3.14) и което не е препоръчително да бъде пренебрегнато.

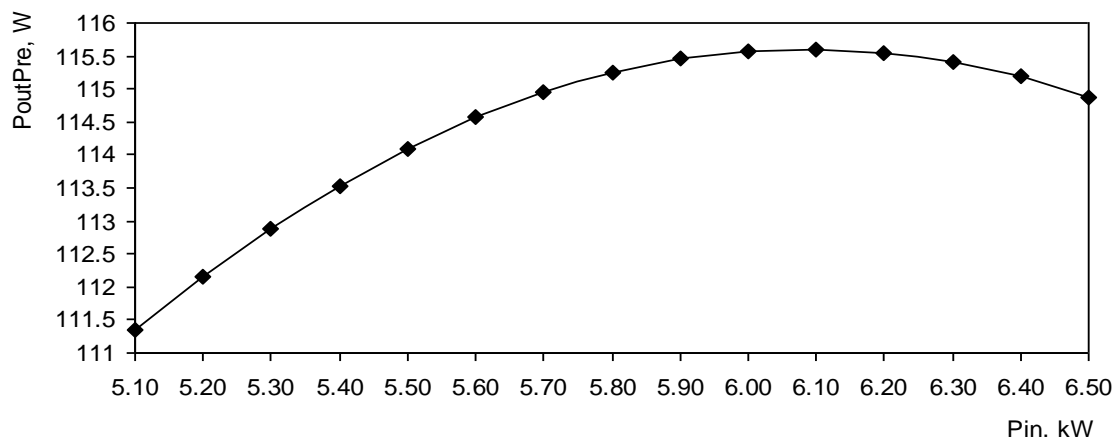
В) Изследване на поведението на изходната лазерна мощност с развитите нелинейни модели показва зависимост на  $P_{out}$  от първоначалните данни и възможност за нестабилност. Точността на моделите следва да се потвърждават чрез сравнение с реалните експериментални данни.

Г) Развитият Модел № 2 (уравнения (3.23) - (3.24)) показва най-добри резултати, както в статистически смисъл, така и като точност при отразяване на известни експериментални данни. В уравнение (3.23) отсъстват събираеми от първа степен. Това предполага, че в същност процесите в лазерната тръба са основно нелинейни и всяка независима величина влияе на изходната лазерна мощност само със сложното нелинейно взаимодействие с други величини.

Д) В уравнение (3.23) най-силно е застъпена величината  $Pin$ . Тя участва общо 4 пъти, както самостоятелно, така и на втора степен, а също така в комбинация с други две независими величини, две от събираемите са със знак „плюс“, а другите две - с минус. На Фиг. 3.15 е показана зависимостта на  $P_{out}$  от  $Pin$  при фиксирани стойности на останалите променливи.

Както трябваше да се очаква, зависимостта е нелинейна с ясно очертана оптимална стойност за  $Pin$ . Получената графика много добре отразява физическите процеси, които протичат в

лазерната тръба с повишаване на подаваната електрическа мощност. Първоначално нейното влияние на процесите в лазерната генерация е положително. Това е свързано с повишаване енергията на електроните и заселване на горното лазерно ниво. След преминаване на определена критична стойност се засилват негативните процеси, свързани с прегряване на лазерната тръба-термоионизационна неустойчивост на газовия разряд, термохимична деградация на активното вещество, термично заселване на долното лазерно ниво.



Фиг. 3.15. Зависимост на  $P_{out}$  от  $P_{in}$  при следните фиксирани стойности  $D=60$  mm,  $d_r=58$  mm,  $L=210$  cm,  $PH2=0.6$  Torr,  $PRF=16$  kHz,  $C=1.3$  pF.

### 3.5.4.5.1. Частичен нелинеен модел № 5 от трета степен за изходната лазерна мощност $P_{out}$ [D31], [145]

Създаденият най-добър непараметричен модел от трета степен за  $P_{out}$  с MARS метод [148] съдържа общо 45 базисни функции от първа, втора и трета степен. За тази цел е било достатъчно да участват само 8 независими величини:  $P_{in}$ ,  $C$ ,  $PRF$ ,  $PL$ ,  $d_r$ ,  $PH2$ ,  $Tr$  и  $P_{ne}$ . Величините  $D$  и  $L$  са отпаднали от модела. В тези 45 базисни функции има само три члена от трета степен:  $\{PL, C, P_{in}\}$ ,  $\{PRF, Tr, PH2\}$  и  $\{PRF, C, P_{in}\}$ . Тъй като MARS моделът изключва повторения, към тях добавяме всяка една от 10 независими величини на трета степен. Регресионното уравнение от трета степен за  $P_{out}$  се получава от уравнение (3.22), като в дясната му част добавим по-горните величини от трета степен. В кратък вариант уравнението има следния общ вид:

$$\hat{P}_{out} = \text{дясна част ур. (3.22)} + a_{66}PL.C.P_{in} + a_{67}PRF.Tr.PH2 + a_{68}PRF.C.P_{in} + a_{69}D^3 + a_{70}L^3 + a_{71}d_r^3 + a_{72}P_{in}^3 + a_{73}PL^3 + a_{74}PRF^3 + a_{75}P_{ne}^3 + a_{76}PH2^3 + a_{77}C^3 + a_{78}Tr^3 \quad (3.29)$$

Отново е използвана обратна регресия (Backward). Полученото нестандартизирано уравнение за  $P_{out}$  има вида:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{out} = & 10,243 + 64,453P_{in} - 0,143Tr + 0,023D.PRPF + 0,303D.C - 0,061d_r.PL \\ & - 0,011L.PRPF - 0,419L.C - 2,009P_{in}.PL + 0,437P_{in}.PRPF + 2,341PL.PH2 \\ & - 2,791PL.C - 0,579PRF.C + 0,165C.Tr - 0,011D^2 + 0,025d_r^2 - 41,015PH2^2 \\ & - 11,333C^2 + 0,003PL^3 - 2,1 \cdot 10^{-5} PRF^3 + 1,613C^3 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Ще отбележим, че в уравнение (3.30) има само три величини от трета степен:  $PL^3$ ,  $PRF^3$  и  $C^3$ . Съответното стандартизираното уравнение има следния вид:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{out} = & 2,262P_{in} - 0,094Tr + 0,760D.PRPF + 0,268D.C - 0,284d_r.PL - 0,524L.PRPF \\ & - 1,323L.C - 0,771P_{in}.PL + 0,428P_{in}.PRPF + 0,171PL.PH2 - 0,616PL.C \\ & - 0,460PRF.C + 1,228C.Tr - 0,275D^2 + 0,945d_r^2 - 0,184PH2^2 \\ & - 0,826C^2 + 0,087PL^3 - 0,271PRF^3 + 0,440C^3 \end{aligned} \quad (3.31)$$



Направено е сравнение между експериментално получените резултати за  $P_{out}$  и получените такива с помощта на уравнение (3.30) -  $P_{outPre}$ . Средната относителна грешка в областта на големите изходни мощности е 5.41%. Това е най-добрият резултат от всички развити полиномни модели за  $P_{out}$ . По статистически показатели модел 5 с уравнения (3.30), (3.31) също е най-добрият. За него  $R=0.998$ ;  $R^2=0.976$ , Std. Error of the Estimate = 5.677.

В следващата Табл. 3.36 с уравнение (3.30) е направено прогнозиране на поведението на изходната мощност  $P_{out}$ . За простота геометричните параметри ( $D$ ,  $dr$ ,  $L$ ) не са променяни.

Табл. 3.36. Предсказани стойности на „предполагам експеримент“ за изходната лазерна мощност  $P_{out}$  на CuBr лазер с модел № 5 - уравнение (3.30).

D, mm	dr, mm	L, cm	Pin, kW	PL, W/cm	PH2, Torr	PRF, kHz	Pne, Torr	C, pF	Tr, K	$P_{outPre}$ , W
58	58	200	5.00	12.50	0.60	17.5	20	1.30	490	120.0
58	58	200	5.10	12.75	0.55	18.0	20	1.29	495	123.2
58	58	200	5.15	12.875	0.50	18.5	20	1.28	495	125.2
58	58	200	5.20	13.00	0.40	19.0	20	1.25	500	128.7
58	58	200	5.50	13.75	0.35	20.0	20	1.22	505	133.8
58	58	200	5.60	14.00	0.30	21.0	20	1.20	510	136.5

На първия ред за сравнение е показан експериментален резултат с изходна лазерна мощност  $P_{out} = 120W$ . От таблицата се вижда, че за повишаване на  $P_{out}$  величините  $Pin$ ,  $PRF$  и  $Tr$  трябва да нарастват, а величините  $PH2$  и  $C$  - да намаляват.

Независимо, че модел 5 е от трета степен, съгласно уравнение (3.31) и Табл. 3.36 следва, че за повишаване на изходната лазерна мощност най-голямо влияние има величината  $Pin$ , което съвпада напълно с получените досега резултати.

### 3.5.4.5.3. Анализ на резултатите от нелинейното моделиране от трета степен

Развитите модели от трета степен за лазерната мощност и ефективност на CuBr лазер във видимата зона показват, че процесите, определящи тяхното поведение, са силно нелинейни. Това значително затруднява детайлния анализ за влиянието на всяка една от 10-те независими величини. На практика такъв анализ е невъзможен. Можем само качествено да търсим потвърждение с по-рано направени заключения от по-простите модели. Развитите нелинейни модели от трета степен са най-добрите от всички други с по-ниска степен. Направените изследвания с нелинейни параметрични уравнения с използване на фактори от четвърта и по-висока степен [134] показват, че техните статистически показатели се влошават. Остава изводът, че нелинейните параметрични модели от трета степен най-точно описват процесите в активната лазерна тръба.

Анализът от проведените компютърни симулации (Табл. 3.36 и 3.39), показват, че е възможно създаване на лазерни източници с повишени изходни параметри със запазване на геометричните размери на лазерната тръба. Този извод се различава от резултатите от модел 1, където повишаване на  $P_{out}$  е свързано с увеличаване на геометричните размери. Търсенето на нелинейни решения, при които се променят само някои от независимите величини дава нови възможности в развитието на разглеждания тип лазер. Повишаване на изходната лазерна мощност и ефективност при постоянен геометричен дизайн позволява да се запазят редица конструктивни елементи на лазерната система: лазерен резонатор, спомагателната лазерна конструкция, в която се намира лазерната тръба, лазерната система, която е разработена за промишлено или технологично прилагане на лазерния източник. На практика старата лазерна тръба трябва само да се замени с нова, с по-високи изходни характеристики, но със същите геометрични размери. Тази възможност и определя един от най-важните изводи от развитите нелинейни модели.

## ГЛАВА 4. Статистическо изследване на UV Cu+ Ne-CuBr лазер

Предмет на изследване е лазер, излъчващ в ултравиолетовата област с дължини на вълните 248.6, 252.9, 259.7, 260.0, и 270.3 nm. За моделирането следваме методиките от Глава 3.

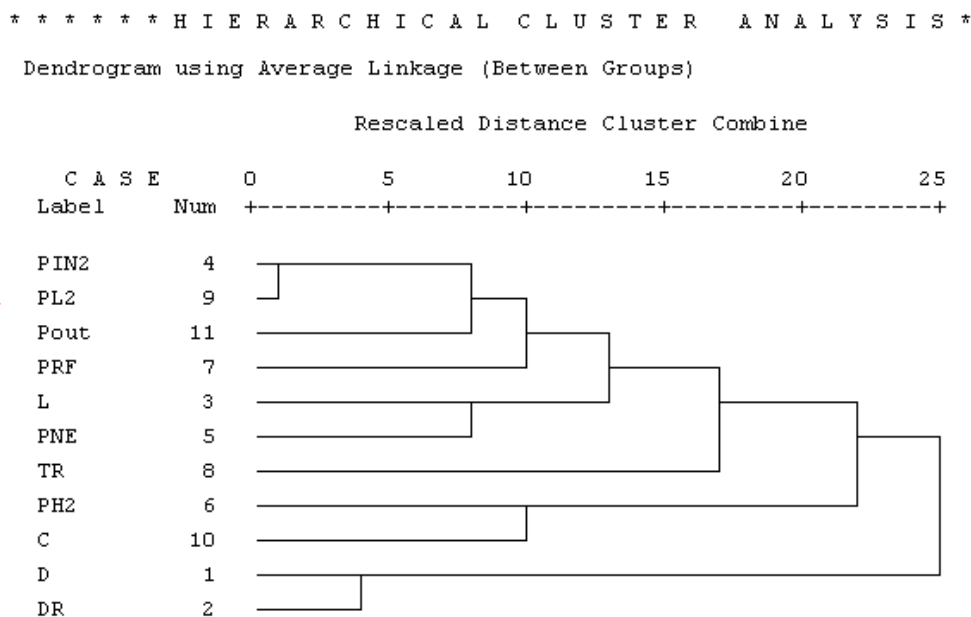
### 4.1. Клъстерен анализ на основните параметри на лазера [D27], [D32], [141], [146]

Основните задачи за решаване в настоящия параграф са: (1) Получаване на основната структура на отношенията между измерваните лазерни параметри (променливи) чрез методите на клъстерен анализ, групирането им от различните нива на сходство и избор на оптимален брой клъстери; (2) Определяне на мястото на изходната лазерна мощност  $P_{out}$  в тази структура и определяне на степента на влияние на всяка от променливите на  $P_{out}$ , съответно; (3) Обсъждане на прилагането на получените резултати с цел да се подобри планирането на експеримента.

Ще разгледаме отново 10 независими величини, аналогично на разгледаните 10 в Глава 3. Тези величини са:  $D$ , mm – вътрешен диаметър на лазерната тръба;  $L$ , cm – разстояние между електродите;  $P_{Ne}$ , Torr – налягането на буферния газ неон;  $Prf$ , kHz – честота на повторение на импулсите;  $Pin$ , kW – входна електрическа мощност;  $PH_2$ , Torr – налягане на добавъчния газ водород;  $Tr$ , °C – температура на резервоара с CuBr;  $dr$ , mm – вътрешен диаметър на пръстените;  $PL$ ,  $W.cm^{-1}$ , относителна мощност на единица дължина;  $C$ , nF, еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия. Величината  $P_{out}, mW$  – изходна лазерна мощност е зависима променлива. Това ще ни позволи да направим аналогия с резултатите от Глава 3.

За 10те независими величини по метода на междугруповото свързване и мярка за сходство евклидовото разстояние е получено оптимално клъстерно решение с 3 клъстера [D32], а именно:  $\{Pin_2, PL_2, L, PNE, Prf, Tr\}$ ,  $\{D, DR\}$ ,  $\{PH_2, C\}$ . Определено е също мястото на зависимата величина изходна лазерна мощност  $P_{out}$  сред тези 10 независими величини групирана към първия клъстер. Това ще позволи да се определи степента на влияние на всяка една от тях. Полученият резултат ще се използва за анализ и физическа интерпретация на резултатите след провеждане на факторния и регресионен анализ. На Фиг. 4.4 е представена съответната дендрограма от клъстерния анализ, получена по метода на междугруповото свързване и мярка за сходство –евклидово разстояние.

От фиг. 4.4 се вижда, че най-близки (по смисъла на евклидовото разстояние) до величината  $P_{out}$  са величините  $Pin$  и  $PL$ .



Фиг. 4.4. Дендрограма на 10 независими величини и зависимата изходна величина  $P_{out}$  за UV лазер, получена по метода на междугруповото свързване (Average Linkage (Between Groups)).

## 4.2. Факторен анализ на UV Cu+ Ne-Cu лазер [D32]

Провеждаме факторен анализ, като следваме методиката с процедурите от параграф 3.2.2. Получената корелационна матрица е показана на Табл. 4.4.

Табл. 4.4. Корелационна матрица на 10те независими величини и зависимата величина *Pout*.

Correlation Matrix												
	D	DR	L	PIN2	PNE	PH2	PRF	TR	PL2	C	Pout	
Correlation	D	1.000	.785	-.646	-.450	-.840	-.177	-.003	.037	-.286	-.103	-.571
	DR	.785	1.000	-.765	-.326	-.867	-.190	.014	.157	-.082	-.110	-.664
	L	-.646	-.765	1.000	.460	.583	.056	.014	-.031	.146	.032	.555
	PIN2	-.450	-.326	.460	1.000	.338	-.149	.494	.237	.945	-.066	.646
	PNE	-.840	-.867	.583	.338	1.000	.068	.090	.027	.172	.038	.536
	PH2	-.177	-.190	.056	-.149	.068	1.000	-.387	-.834	-.185	.450	.198
	PRF	-.003	.014	.014	.494	.090	-.387	1.000	.430	.543	-.237	.332
	TR	.037	.157	-.031	.237	.027	-.834	.430	1.000	.281	-.481	-.159
	PL2	-.286	-.082	.146	.945	.172	-.185	.543	.281	1.000	-.084	.514
	C	-.103	-.110	.032	-.066	.038	.450	-.237	-.481	-.084	1.000	.278
	Pout	-.571	-.664	.555	.646	.536	.198	.332	-.159	.514	.278	1.000
Sig. (1-tailed)	D	.000	.000	.000	.000	.000	.004	.485	.287	.000	.060	.000
	DR	.000	.000	.000	.000	.000	.002	.418	.009	.107	.048	.000
	L	.000	.000	.000	.000	.000	.201	.417	.318	.014	.313	.000
	PIN2	.000	.000	.000	.000	.000	.012	.000	.000	.000	.161	.000
	PNE	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.087	.344	.005	.282	.000
	PH2	.004	.002	.201	.012	.154	.000	.000	.000	.002	.000	.001
	PRF	.485	.418	.417	.000	.087	.000	.000	.000	.000	.000	.000
	TR	.287	.009	.318	.000	.344	.000	.000	.000	.000	.000	.008
	PL2	.000	.107	.014	.000	.005	.002	.000	.000	.000	.102	.000
	C	.060	.048	.313	.161	.282	.000	.000	.000	.102	.000	.000
	Pout	.000	.000	.000	.000	.000	.001	.000	.008	.000	.000	.000

a. Determinant = 1.73E-007

Отново имаме 4 независими величини, които имат корелационни коефициенти с *Pout*, по-малки по модул от 0.3. Това са величините PH2, PRF, PR и C. Това означава, че в рамките на установените от експеримента оптимални стойности тези величини имат несъществено влияние на величината *Pout* и затова в бъдещите изследвания те могат да бъдат пренебрегнати. За разлика от факторния анализ при CuVg лазер, тук отпада величината PH2, а като съществена величина се появява величината PNe. Към този факт ще се върнем при анализа и физическата интерпретация на получените резултати. Друг важен резултат е този, че корелационните коефициенти на величините D и DR са отрицателни. Това означава, че в бъдещи експерименти с цел създаване на нови лазерни източници с повишена изходна мощност тези величини трябва да се намаляват.

Следващата Табл. 4.6 показва групирането на бте значими независими величини и величината *Pout* по фактори. Величината *Pout* попада във втория фактор с величините *PIN2* и *PL2*. Това означава, че тези две величини имат най-голямо влияние на изходната лазерна мощност. Ако погледнем дендрограмата на Фиг. 4.4 ще видим, че същите тези две величини се намират най-близко до величината *Pout*. Резултатите от проведения клъстерен и класификационен анализ са сходни за най-силното влияние на *PIN2* и *PL2* на величината *Pout*.

Табл. 4.6. Групиране на значимите независими величини и величината *Pout* по фактори.

	Rotated Component Matrix		
	Component		
	1	2	3
PNE	.920		
D	-.847		
DR	-.730		
PL2		.994	
PIN2		.931	
L			.885
Pout		.588	

Extraction Method: Principal Component Analysis.  
Rotation Method: Equamax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 5 iterations.

### 4.3. Регресионен анализ на UV Cu+ Ne-Cu лазер [D32]

В този параграф по аналогия с параграф 4.2 търсим регресионно уравнение по метода на регресия с главните елементи от типа  $P_{out} \approx a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_0$ . На основа на получените резултати можем да запишем следните нестандартизирано и стандартизирано уравнение:

$$P_{out} \approx 410.045 - 158.616F_1 + 164.241F_2 + 121.808F_3 \quad (4.1)$$

$$\overline{P_{out}} \approx -0.467F_1 + 0.483F_2 + 0.358F_3 \quad (4.2)$$

За разлика от Глава 3, нестандартизираното уравнение (4.1) не може да се използва за предсказване на изходната лазерна мощност на УВ лазера. Направените изчисления показват, че за известни експериментални значения изчислената лазерна мощност с (4.1) се отличава с 25-30 %. Основната причина е тази, че в разглеждания лазер процесите са силно нелинейни и никакви линейни модели не могат да бъдат използвани. По тази причина е необходимо директно да преминем към нелинейни параметрични уравнения за определяне на изходната лазерна мощност  $P_{out}$ .

#### 4.3.1. Параметричен модел от втора степен за изходната лазерна генерация на UV Cu+ Ne-Cu лазер [D28], [179].

Търсеното уравнение от втора степен, по аналогия с параграф 3.5.4, ще бъде от вида (3.22). С помощта на постъпкова регресия намираме следното нестандартизирано регресионно уравнение:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{out} = & 3215.850 - 239,219 PRF + 8,3 D.PNE - 0,267 D.TR - 4,547 DR.L - 0,114 L.PH2 \\ & + 0,370 PIN2.PRPF + 3388,371 PNE.PH2 - 0,142 PNE.TR - 174,138 PH2.TR \\ & + 15929,157 PH2.PL2 - 17,179 TR.PL2 + 0,17 TR.C - 1,394 PL2.C + 1,681 D^2 \\ & + 18,646 DR^2 + 0,730 L^2 + 0,026 TR^2 + 2535,369 PL2^2 - 0,004 C^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

В него участват всичките 10 независими величини. Има само една величина от първа степен -  $PRF$ . Всички други величини са от втора степен. Това показва, че процесите в газовия разряд и лазерната генерация са силно нелинейни. Всяка една от независимите величини влиза в сложно взаимодействие с останалите и по този начин оказва своето влияние на изходната лазерна мощност.

Съответното стандартизирано уравнение има вида:

$$\begin{aligned} \overline{P}_{out} = & -1,788 PRF + 0,574 D.PNE - 2,192 D.TR - 2,898 DR.L2 - 3,851 L.PH2 \\ & + 3,977 PIN2.PRPF + 2,393 PNE.PH2 - 1,080 PNE.TR - 3,670 PH2.TR \\ & + 1,338 PH2.PL2 - 9,177 TR.PL2 + 1,971 TR.C - 0,807 PL2.C \\ & + 0,755 D^2 + 2,822 DR^2 + 1,771 L^2 + 2,303 TR^2 + 9,270 PL2^2 - 1,238 C^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ще отбележим, че коефициентите пред съответните събираеми показват в относителен вид тяхната степен на влияние на  $P_{out}$ . Уравнение (4.5) може да бъде използвано за анализ и оценка на всяка една от 10 величини и всяка една комбинация върху работата на лазерния източник.

Направено е сравнение с изчислената стойност на  $P_{out}$  съгласно уравнение (4.4) и експериментално получената мощност. Средната относителна грешка в областта на големите стойности на  $P_{out}$  е 5,59%. Това показва, че модел (4.4) адекватно описва процесите в лазерната тръба и може да се използва за предсказване на нови стойности на лазерната генерация  $P_{out}$  с цел повишаване на средната изходна мощност. Част от получените резултати от компютърните експерименти са показани в Табл. 4.10. За сравнение, в първия ред е даден известен експериментален резултат с максимално измерена изходна мощност  $P_{out} = 1300 \text{ mW}$ .

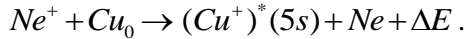
С нарастването на величините  $PIN2$ ,  $PH2$ ,  $PL2$  и  $C$  имаме нарастване на  $P_{out}$ . За увеличаване на  $P_{out}$  геометричните параметри на тръбата  $D$ ,  $DR$  и  $L$ , а също така и величините  $PNE$  и  $TR$  трябва да намаляват. Получените резултати показват сложната нелинейна зависимост, която съществува между предикторите и величината  $P_{out}$ . Всяка една от 10 величини действа на лазерната генерация не самостоятелно, а с взаимодействие с друга такава.

Табл. 4.10. Предсказване на нови стойности на лазерната мощност на УВ лазер с уравнение (4.4).

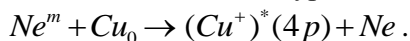
$D$ , mm	$DR$ , mm	$L$ , cm	$PIN2$ , W	$PNE$ , Torr	$PH2$ , Torr	$PRF$ , KHz	$TR$ , °C	$PL2$ , W/cm	$C$ , pF	$Pout$ , mW
6	6	90	1900	19	0	25,0	560	2,638	372,18	1300,0
6	6	90	1910	19	0	25,0	560	2,653	372,18	1350,3
6	6	90	1910	18	0	25,0	560	2,653	372,18	1387,2
6	6	90	1910	18	0	25,1	560	2,653	372,18	1401,4
6	6	90	1910	18	0	25,1	558	2,653	372,18	1437,1
6	6	90	1910	18	0	25,1	558	2,653	375,00	1446,9
6	6	90	1910	18	0,01	25,1	558	2,653	375,00	1522,4

### 4.3.2. Анализ и физическа интерпретация от проведения кълстерен, факторен и регресионен анализ за изходната лазерна мощност $P_{out}$ на УВ лазер

Необходимо е първоначално да разгледаме физическите основи на възникване на лазерната генерация в УВ област. За тази цел е приложена диаграма с енергийните нива на системата, Фиг. 4.5. От приложената фигура се вижда, че горното лазерно ниво  $5s^3D_{1,2,3}$  (линия 248.6 nm) се намира непосредствено под основното състояние на  $Ne^+$ . Енергийната разлика е малка ( $\sim 0.2$  eV), така, че лесно може да бъде заселено с кинетичното уравнение



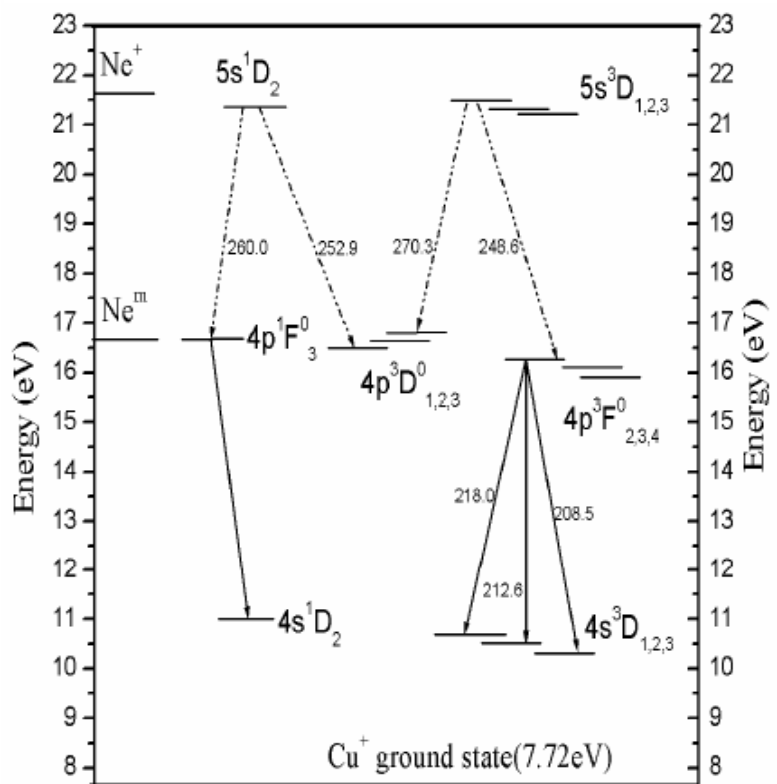
Долното лазерно ниво  $4p^3F_0$  се разселва главно с УВ спонтанни емисии на нива  $4s^3D_{1,2,3}$ , които са метастабилни. Долното лазерно ниво и метастабилните нива могат лесно да бъдат заселени с Пенинговка реакция от метастабилното ниво на неона  $Ne^m$  с кинетичното уравнение:



Преимущественото заселване на тези нива може да доведе до намаляване на инверсната населеност.

Направеният кратък анализ на основните кинетични процеси на УВ излъчване показва съществената роля на буферния газ неон. По тази причина, за разлика от Глава 3, той има съществено значение при формиране на лазерната генерация.

Получените резултати от кълстерния, факторен и регресионен анализ потвърждават този извод. За възбуждане на горните лазерни нива и на ниво  $Ne^+$  са необходими високи стойности на енергията на електроните и на приложеното напрежение между електродите. По тази причина водещ параметър за лазерната генерация отново е приложената електрическа мощност  $P_{in}$ . Прави впечатление, че за разлика от Глава 3, относителната величина  $PL$  е положителна. Това означава, че приложената електрическа мощност трябва да расте с по-голяма скорост, отколкото разстоянието между електродите ( $PL = \frac{P_{in}}{L}$ ). Това гарантира по-бързото нарастване на



Фиг. 4.5. Схема на енергийните нива на системата  $Cu^+$  и  $Ne$ .

надлъжното електрическо поле ( $E = \frac{U_{el}}{L}$ ) и свързаното с това повишаване на енергията на електроните. За повишаване на изходната лазерна генерация величините  $D$  и  $DR$  трябва да намаляват. Намаляване на диаметъра на тръбата позволява да се увеличи относителното влияние на процесите на дифузия, дрейф и рекомбинация на частиците на стените на тръбата. Увеличаване на загубите на електрони за сметка на тяхната рекомбинация на стените на тръбата довежда при една и съща подаване електрическа мощност до повишаване на междуелектродното напрежение и надлъжното електрическо поле. С това се повишава енергията на електроните. Дифузията на медните атоми от долното лазерно ниво и метастабилните атоми към стените на тръбата позволява те да бъдат допълнително разселвани, като отдават своята енергия на тръбата. Така, наред с основния процес на разселване (спонтанната УВ емисия) се появява и допълнителна алтернатива, която позволява да се повиши инверсната заселеност. Малко неочаквано ролята на водорода остава подценена, тъй като тази величина отпада от проведения факторен анализ. В този смисъл това трябва да бъде тълкувано, че установените оптимални стойности на налягането на водорода от 0.02-0.04 Torr трябва да се подържат в бъдещи експериментални изследвания.

Развитият параметричен модел от втора степен за изходната лазерна мощност показва, че процесите в активния лазерен обем са силно нелинейни. В уравнение (4.4) участват всичките 10 независими величини. Това означава, че всяка една от тези величини може да има влияние на  $P_{out}$  само със сложното и едновременно взаимодействие с някои от останалите величини. Проведените статистически експерименти при изчисляване на лазерни източници с повишена изходна мощност са направени в условията на непроменен геометричен дизайн на лазерната тръба. Оказва се, че за повишаване на лазерната мощност величините  $PIN2$ ,  $PH2$ ,  $PL2$  и  $C$  трябва да нарастват, а величините  $PNE$  и  $TR$  трябва да намаляват. Това означава, че е възможно повишаване на  $P_{out}$  на съществуващи лазерни източници (с непроменена геометрия на тръбата) при подходящо и едновременно променяне на останалите независими величини. Развитият нелинеен модел позволява да се търси повече от едно решение при разработване на нови лазерни източници при специфично зададени начални условия.

#### 4.4. Статистическо изследване на времето на живот на UV Cu+ Ne-Cu лазер [D29], [180]

Целта на настоящия параграф е чрез различни статистически техники за първи път да изследва от какво зависи срока на служба на конкретен лазерен източник, кои от основните независими величини и в каква степен оказват най-силно влияние на тази величина.

За решаване на тази задача като обект на изследване е избран лазер с пари на меден халогенид, излъчващ в ултравиолетовата област [53, 105, 165, 166, 167]. В цитираните публикации има приложени експериментални резултати за срока на служба на този тип лазер, което позволява да се използват различни статистически методи за изследване на тази величина.

Ще разгледаме отново същите 10 независими величини (предиктори):  $D$  (mm) – вътрешен диаметър на лазерната тръба,  $DR$  (mm) – вътрешен диаметър на пръстените,  $L$  (cm) – разстояние между електродите (дължина на активната зона),  $PIN$  (kW) – входна мощност с отчитане на загубите,  $PH2$ (Torr) – налягане на водорода,  $PL$ (W/cm) – специфична мощност на единица дължина,  $PRF$  (kHz) – честота на повторение на импулсите,  $PNE$  (Torr) – налягане на неона,  $C$  (nF) – еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия,  $TR$  ( $^{\circ}C$ ) – температура на резервоара с меден бромид.

Зависима изходна величина ще бъде  $Ltime$  – срок на служба на лазерния източник.

##### 4.4.1. Клъстерен анализ

Следвайки процедурите, първият етап от клъстерния анализ е получаване на матрицата на близост, Табл. 4.11. В този случай като показател за степен на сходство между обектите е избран квадратът на евклидовото разстояние.

Табл. 4.11. Матрица на близост (Proximity Matrix) за 10те независими величини и зависимата величина Ltime за УВ лазер.

Case	Matrix File Input										
	D	DR	L	Pin	PNE	PH2	PRF	TR	PL	C	LTime
D	0	98.2	750.5	661.2	838.9	536.8	457.2	439.0	586.3	502.9	538.0
DR	98.2	0	804.9	604.5	851.5	542.7	450.0	384.6	493.6	506.3	543.9
L	750.5	804.9	0	246.2	190.2	430.6	449.7	470.32	389.6	441.2	426.0
Pin	661.2	604.5	246.3	0	302.1	523.9	230.6	348.02	25.3	485.9	529.8
PNE	838.9	851.4	190.2	302.1	0	425.2	414.8	443.8	377.6	438.6	423.9
PH2	536.7	542.6	430.6	523.9	425.2	0	632.7	836.2	540.6	250.7	99.8
PRF	457.1	449.6	449.7	230.6	414.8	632.6	0	260.0	208.5	564.1	629.7
TR	438.9	384.5	470.3	348.0	443.8	836.2	260.0	0	327.9	675.1	842.3
PL	586.3	493.5	389.6	25.3	377.6	540.6	208.5	327.9	0	494.3	548.9
C	502.8	506.2	441.3	485.9	438.6	250.8	564.2	675.2	494.4	0	427.4
LTime	538.0	543.9	426.1	529.9	424.0	99.8	629.7	842.3	549.0	427.4	0

От приложената таблица се вижда, че най-малкият квадрат на разстояние е 99.8 между Ltime и PH2. Най-близкото значение до PH2 е 250.8 и това се отнася за величината C.

#### 4.4.2. Факторен анализ

По аналогия с клъстерния анализ, основен елемент на факторния анализ е корелационната матрица, Табл. 4.13.

Табл. 4.13. Корелационна матрица на 10те независими величини и зависимата величина Ltime.

Correlation Matrix <sup>a</sup>												
	D	DR	L	Pin	PNE	PH2	PRF	TR	PL	C	LTime	
Correlation	D	1.000	.785	-.646	-.450	-.840	-.177	-.003	.037	-.286	-.103	-.180
	DR	.785	1.000	-.765	-.326	-.867	-.190	.014	.157	-.082	-.110	-.193
	L	-.646	-.765	1.000	.460	.583	.056	-.031	.146	.032	.066	.066
	Pin	-.450	-.326	.460	1.000	.338	-.149	.494	.237	.945	-.066	-.162
	PNE	-.840	-.867	.583	.338	1.000	.068	.090	.027	.172	.038	.070
	PH2	-.177	-.190	.056	-.149	.068	1.000	-.387	-.834	-.185	.450	.781
	PRF	-.003	.014	.014	.494	.090	-.387	1.000	.430	.543	-.237	-.381
	TR	.037	.157	-.031	.237	.027	-.834	.430	1.000	.281	-.481	-.847
	PL	-.286	-.082	.146	.945	.172	-.185	.543	.281	1.000	-.084	-.204
	C	-.103	-.110	.032	-.066	.038	.450	-.237	-.481	-.084	1.000	.063
	LTime	-.180	-.193	.066	-.162	.070	.781	-.381	-.847	-.204	.063	1.000
Sig. (1-tailed)	D		.000	.000	.000	.000	.004	.485	.287	.000	.060	.003
	DR	.000		.000	.000	.000	.002	.418	.009	.107	.048	.002
	L	.000	.000		.000	.000	.201	.417	.318	.014	.313	.161
	Pin	.000	.000	.000		.000	.012	.000	.000	.000	.161	.007
	PNE	.000	.000	.000	.000		.154	.087	.344	.005	.282	.146
	PH2	.004	.002	.201	.012	.154		.000	.000	.002	.000	.000
	PRF	.485	.418	.417	.000	.087	.000		.000	.000	.000	.000
	TR	.287	.009	.318	.000	.344	.000	.000		.000	.000	.000
	PL	.000	.107	.014	.000	.005	.002	.000	.000		.102	.001
	C	.060	.048	.313	.161	.282	.000	.000	.000	.102		.173
	LTime	.003	.002	.161	.007	.145	.000	.000	.000	.001	.173	

a. Determinant = 5.20E-008

От горната част на Табл. 4.13 се вижда, че най-високи коефициенти на корелация с изходната величина Ltime имат величините TR (-0.847) и PH2 (0.781), които са и статистически значими.

В следващата Табл. 4.14 е показано групирането на 10 независими величини в 3 фактора. Към тях е прибавена и величината Ltime. Още веднъж да отбележим, че съгласно техниката на факторния анализ, между величините, намиращи се в един и същи фактор има голяма степен на корелация. Между величините, намиращи се в различни фактори има малка степен на корелация или такава корелация отсъства. По този начин самите фактори са независими и това позволява те да се използват в регресионния анализ за построяване на регресионни уравнения.

Табл. 4.14. Разпределение на 10те независими величини и зависимата величина Ltime по фактори.

	Component		
	F1	F2	F3
DR	-.946		
PNE	.916		
D	-.890		
L	.824		
TR		-.949	
PH2		.930	
LTime		.843	
C		.532	
PL			.958
Pin			.895
PRF			.658

Extraction Method: Principal Component Analysis.  
 Rotation Method: Quartimax with Kaiser Normalization.  
 Rotation converged in 5 iterations.

От табл. 4.14 се вижда, че величината LTime заедно с величините TR, PH2 и C се намира във втория фактор. Следователно, между тези величини има висока степен на корелация. На величината Ltime от 10 независими величини най-силно влияят величините TR, PH2 и C. По отношение на величините TR и PH2 това е потвърждение от направения вече анализ на корелационната матрица, Табл. 4.13. На пръв поглед изненада предизвиква появата във втория фактор на величината C. От корелационната матрица се вижда, че тя на практика не корелира с величината Ltime (коефициент на корелация 0.063) и няма пряко влияние на нейното поведение. От същата таблица се вижда, че тя има сравнително висока степен на корелация с величините TR (-0.481) и с PH2 (0.450) и по тази причина се намира във втория фактор. Това ни дава основание да предположим, че величината C може би не влияе пряко на величината Ltime, но нейното влияние има по-сложен, нелинеен характер. Величината C влияе съществено на Ltime чрез нейното взаимодействие и посредством величините TR и PH2. Това означава, че може би се появяват нови, нелинейни величини от втора степен от типа *TR.C* и *PH2.C*. На този етап отговор на този въпрос не може да бъде даден, защото предлаганият статистически анализ е линеен. Не се разглежда възможното, по-сложно нелинейно влияние от втора степен, което може да се получи, ако всяка една от независимите величини влиза във взаимодействие поотделно с останалите.

#### 4.5. Нелинеен модел от втора степен за времето на живот на UV Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr лазер [D30], [181]

Целта на настоящия параграф е чрез методите на регресионния анализ да се продължи изследването на срока на служба на UV Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr лазер. По същество този параграф се явява продължение на регресионния анализ от параграф 4.3. Тъй като лазерните източници имат силно нелинеен характер, важно е установяване на нелинейните зависимости и тяхното влияние на времето на живот на лазерния източник.

Ще търсим коефициентите на регресионно уравнение от втора степен от вида:

$$Ltime = b_0 + \sum_{i=1}^{10} b_j x_j + \sum_{\substack{j,k=1 \\ k \leq j}}^{10} b_{j,k} x_j x_k \quad (4.9)$$



В уравнение (4.9) участват величините от първа степен и всички възможни комбинации от два елемента, включително и повторенията. Необходимо е да бъдат определени общо 66 неизвестни коефициенти. От всички неизвестни коефициенти трябва да изберем само тези, които са статистически значими, в частност с ниво на значимост  $\text{Sig.} < 0,05$ .

На основание на проведеня анализ получаваме следното нестандартизирано уравнение:

$$\begin{aligned} \hat{Ltime} = & 4182.369 - 99.837PL + 1.859D.PNE + 0.493D.TR - 1.132DR.L \\ & - 4.445DR.PNE - 23.277DR.PL - 0.038PIN.PRF - 789.072PNE.PH2 \\ & + 0.104PHE.C + 27.291PH2.TR - 0.020TR.C - 7.827D^2 + 2.439DR^2 \\ & + 0.056L^2 - 0.463PH2^2 + 0.562PRF^2 - 0.006TR^2 + 197.974PL^2 + 0.006C^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

В уравнение (4.10) участват всичките 10 независими величини, като има само една величина от първа степен -  $PL$ . Всички други величини са от втора степен. Това още веднъж показва, че протичащите физични процеси в лазерната тръба имат силно нелинеен характер и в частност това се отнася и до влиянието им върху времето на живот на лазерното устройство. На практика всяка една от независимите величини няма самостоятелно въздействие, а чрез сложно взаимодействие с останалите оказва своето влияние върху изходната величина  $Ltime$ .

За проверка за адекватност на модела е направено сравнение с известни от експеримента значения на  $Ltime$  и изчислените при същите начални условия по (4.10). Средната относителна грешка на предсказаните от модела стойности за  $Ltime$  и експерименталните измервания е в рамките до 2.5%. Това показва, че развитият регресионен модел достатъчно адекватно описва получените експериментални данни. На практика не е възможно да се оцени самостоятелното влияние на 10 независими величини, защото всяка една от тях не действа непосредствено на  $Ltime$ , а само с комбинация с някоя от останалите величини, при това повече от един път.

#### 4.5.1. Симулация, анализ и физическа интерпретация на получените резултати на нелинейния модел от втора степен за времето на живот на UV Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr лазер

За оценка степента на влияние на всяка една от 10 независими величини ще направим симулация, като използваме нестандартизираното уравнение (4.10). На база последния ред в долната Табл. 4.21, всяка една от 10 величини е увеличена в рамките на 10%, изчислена е новата стойност на  $Ltime$  и нейното относително изменение в проценти.

На Табл. 4.21 са показани получените резултати от симулацията, а именно - относителното изменение на величините, което показва степента на влияние на всяка една от тях върху величината  $Ltime$ . Ще се спрем по-подробно на влиянието само на 4 от тях, за които има ясна физическа интерпретация - това са величините  $TR$ ,  $C$ ,  $PH2$  и  $PRF$ .

Табл. 4.21. Симулация за оценка на относителното влияние на 10 независими величини върху времето на живот на UV лазер.

Независими величини, увеличени с 10%	Относително изменение на $Ltime$ , %
$D$	0,720641
$DR$	-1,60659
$L$	-17,3644
$PIN$	20,83068
$PNE$	-0,03434
$PH2$	0,00119
$PRF$	-0,01495
$TR$	-2,98427
$PL$	21,44909
$C$	-0,80259

Величината  $TR$  има негативно влияние на  $Ltime$ . С увеличаване на температурата на резервоара се увеличава концентрацията на парите на CuBr и лазерната генерация нараства. Но в

същото време се увеличават загубите на CuVg поради дифузия в студените зони на лазерната тръба. Тъй като лазерната тръба е отпоена, увеличените загуби на CuVg довеждат до бързо спадане на лазерната генерация във времето и по този начин величината *Ltime* намалява.

Величината *PRF* също има негативно влияние. С увеличаване на честотата на повторение на захранващите импулси се увеличава разпрашаването на електродите и замърсяването на лазерната среда. Това намалява лазерната генерация и величината *Ltime*.

С увеличаване на величината *C* нараства подаваната електрическа енергия в лазерната тръба съгласно формулата  $E = U^2 C / 2$ , където *U* е напрежението между електродите на тръбата. Това довежда до физическото разрушаване на тръбата и до намаляване на времето на живот *Ltime*.

Величината *PH2* има позитивно влияние на *Ltime*. С увеличаване на *PH2* при една и съща подавана електрическа мощност намалява токът през тръбата за сметка на увеличаване на приложеното напрежение. По-ниският ток намалява разпрашаването на електродите и тръбата живее по-дълго, *Ltime* расте.

## Заклучение и перспективи

Изпълнени са поставените цели и задачи на дисертационния труд, съгласно приложената по-долу таблица.

В дисертацията са отразени част от изследванията на автора в следните направления:

- Аналитично решаване на уравнението на топлопроводност за три вида лазери с въвеждане на нови гранични условия от трети и четвърти род;
- Аналитично решаване на уравнението на топлопроводност при променливо разпределение на подаваната електрическа мощност в напречното сечение на газовия разряд. Прилагане на обобщено решение на уравнението на топлопроводност;
- Развитие на нов температурен модел за тръби със сложна конфигурация (тръба в тръба);
- Развитие на числен модел за решаване на уравнението на топлопроводност за геометрични конфигурации с повишена сложност;
- Развитие на клъстерен, факторен и регресионен анализ за изследване на процесите в лазерната среда;
- Създаване на параметрични уравнения от първа, втора и трета степен за подобряване на съществуващи и конструиране на нови лазерни източници;
- Изследване на физическите процеси в активната лазерна среда с цел установяване на нови зависимости между зависимите и независими величини.

### Перспективи

Развитата методика, която бе приложена за три вида лазери с пари на халогенида бром, показва, че е достатъчно гъвкава и адаптивна и с успех може да бъде използвана за други типове лазерни източници - газови лазер, лазери с пари на металите и техните съединения. Единственото изискване е наличието на достатъчно на брой експериментални изследвания.

На основа на развитите статистически модели от втора и трета степен е необходима по-детайлна физическа интерпретация на получените резултати с цел по-нататъшното изясняване на сложния нелинеен характер на лазерната генерация.

Важна стъпка е създаване на сложни многомерни модели при разглеждане едновременно на две зависими величини (например лазерна мощност и лазерна ефективност, лазерна мощност и време на живот на лазерния източник), като се приложи техниката за моделиране със структурни уравнения (SEM- Structural Equation Modeling) .

За случая с фиксиран геометричен дизайн и вариране само на няколко характеристики, може да се проведе ефективно планиране на експеримента, например с метода на Тагучи.

На базата на развитите температурни модели да се реализира софтуерна система за симулация на температурния профил при различни геометрични конфигурации и начални условия. Целта е автоматизиране на инженерното проектиране.

Създаване на модел, архитектура и прототип на софтуерна рамка, която да позволява статистическите изследвания, проведени в глави 2 и 3, да бъдат реализирани на базата на интелигентни информационни технологии и методи.

Съответствие между целите, задачите, параграфите и публикациите на дисертационния труд.

Цел	Задача	Параграф	Публикация
1.1	2.1, 2.4	2.3.3, 2.4.4,	D1,D21,
1.2	2.2, 2.4	2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.4.5, 2.4.6, 2.5.5	D2, D3, D4, D5. D6, D7, D9, D10, D11, D12
1.3	2.3, 2.4	2.4.7, 2.5.6	D7, D9
1.4	2.5	3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4	D13-D20, D27, D32, D29
1.5	2.6	3.5	D13-D15, D19, D22,
1.6	2.7	3.5.3, 3.5.4, 3.5.4.4 3.5.4.5, 4.3.1, 4.5	D22, D23, D24, D25, D26, D31, D28, D30
1.7	2.8	3.4.3, 3.5.4.3, 3.5.4.5.3, 4.3.2, 4.4.4, 4.5.1	D13-D20, D13-D15, D19, D22, D31, D28, D29 D30

## Литература

- [1]. C. E. Little, Metal vapour lasers: Physics, engineering and applications, John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
- [2]. N. V. Sabotinov, Metal vapor lasers, in *Gas Lasers*, eds. M. Endo, R. F. Walter, CRC Press, Boca Raton, 449–494, 2006.
- [3]. R. J. Carman, Computer modelling of longitudinal excited elemental copper vapour lasers, in Pulsed metal vapor lasers – physics and emerging applications in industry, medicine and science, editors: C.E. Little and N.V. Sabotinov, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 203-214, 1996.
- [4]. G. G. Lister, Low-pressure gas discharges modeling, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 25, 1649-1680, 1992.
- [5]. G. G. Petrash, The processes limiting the pulse repetition rate in pulsed metal and metal compound vapor lasers, *Laser Physics*, Springer, 10 (5), 994–1008, 2000.
- [6]. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, серия Б, Том XI-4: Газовые и плазменные лазеры, ред. С. И. Яковленко, Физматлит, Москва, 2005.
- [7]. И. П. Запесочный, В. А. Кельман, И. И. Климовский, Л. А. Селезнёва, В. Ю. Фучко, Неоднородность разряда в лазере на парах меди и её влияние на температуру газа, *Теплофизика высоких температур*, Т. 26 (4), 671-680, 1988.
- [8]. N. V. Sabotinov, et al., Bulg. patent No. 28674, 1975.
- [9]. N. V. Sabotinov, N. K. Vuchkov, D. N. Astadjov, Gas laser discharge tube with copper halide vapors, United States Patent 4635271, 1987. <http://www.freepatentsonline.com/4635271.html>
- [10]. N. V. Sabotinov, Recent progress in copper vapor lasers, invited paper, Proceedings of SPIE, Vol. 5120 XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, edited by K. M. Abramski, E. F. Plinski, W. Wolinski, SPIE, Bellingham, WA, 30-37, 2003.
- [11]. C. E. Webb, Metal vapour lasers: New developments and applications, *Proc. SPIE*, 4184, 183-190, 2000.
- [12]. Handbook of Laser Technology and Applications, eds. C. Webb, J. Jones, vol. 2, Institute of Physics Publishing, 2004.
- [13]. Copper Bromide laser Treatment, <https://www.youtube.com/watch?v=7LTk4Bw6WQo>
- [14]. [http://www.laserskinandvein.com.au/laser\\_skin\\_blemish.html](http://www.laserskinandvein.com.au/laser_skin_blemish.html)
- [15]. [http://www.smartskinicare.com/treatments/noninvasive/nonablative/laserlight\\_copper-bromide\\_511-578nm.html](http://www.smartskinicare.com/treatments/noninvasive/nonablative/laserlight_copper-bromide_511-578nm.html)
- [16]. <http://dermnetnz.org/procedures/copper-bromide-laser.html>,
- [17]. <http://skinlaser.co.nz/devices/copper-bromide-laser/>
- [18]. <http://www.agedefy.com/services/flushing-blushing-unwanted-blood-vessel-treatments/copper-bromide-vascular-laser-treatment/>
- [19]. O. Sabotinov, E. Stoykova, Copper-bromide laser system for treatment of dermatological malformations, 13th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Editors: P. A. Atanasov, S. V. Gateva, L. A. Avramov, A. A. Serafetinides, *Proc. SPIE*, 5830, 449-453, 2005.
- [20]. S. McCoy, M. Hanna, P. Anderson, G. McLennan, M. Repacholi, An evaluation of the copper-bromide laser for treating telangiectasia, *Dermatol Surg.*, 22 (6), 551-557, 1996.
- [21]. S. E. McCoy, Copper bromide laser treatment of facial telangiectasia: Results of patients treated over five years, *Lasers in surgery and medicine*, 21 (4), 329-340, 1997.
- [22]. S. Laube, S. W. Lanigan, Laser treatment of rosacea, *Journal of Cosmetic Dermatology*, 1 (4), 188–195, 2002.

- [23]. L. Longo, M. G. Postiglione, O. Marangoni, M. Melato, Two-year follow-up results of copper bromide laser treatment of striae, *Journal of clinical laser medicine & surgery*, 21(3), 157-160, 2003.
- [24]. E. L. Tanzi, J. R. Lupton, T. S. Alster, Lasers in dermatology: Four decades of progress, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 49 (1), 1-34, 2003.
- [25]. M. Ethunandan, T. K. Mellor, Haemangiomas and vascular malformations of the maxillofacial region—A review, *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 44(4), 263–272, 2006.
- [26]. M. L. Elsaie, L. S. Baumann, L. T. Elsaiee, Striae distensae (stretch marks) and different modalities of therapy: an update, *Dermatologic Surgery*, 35 (4), 563–573, 2009, Wiley.
- [27]. K. H. Yoo, B. J. Kim, M. N. Kim, Efficacy of high-energy copper bromide laser (511 and 578 nm) with for deep infantile haemangioma, *Clinical and Experimental Dermatology*, 34 (7), e451–e452, 2009.
- [28]. H. I. Lee, Y. Y. Lim, B. J. Kim, M. N. Kim, H. J. Min, J. H. Hwang, K. Y. Song, Clinicopathologic efficacy of copper bromide plus/yellow laser (578 nm with 511 nm) for treatment of melasma in Asian patients, *Dermatol Surg*, 36(6), 885-893, 2010.
- [29]. V. M. Sheth, A. G. Pandya, Melasma: a comprehensive update: part II, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 65 (4), 699–714, 2011.
- [30]. I. P. Son, K. Y. Park, B. Kim, M. N. Kim, Pilot Study of the Efficacy of 578 nm Copper Bromide Laser Combined with Intralesional Corticosteroid Injection for Treatment of Keloids and Hypertrophic Scars, *Ann Dermatol*, 26(2), 156-61, 2014. <http://dx.doi.org/10.5021/ad.2014.26.2.156>
- [31]. P. G. Foster, Industrial applications of copper bromide laser technology, Thesis (Ph.D.), University of Adelaide, School of Chemistry and Physics, Discipline of Physics, Dept. of Physics and Mathematical Physics, 2005.
- [32]. I. I. Balchev, N. I. Minkovski, N. V. Sabotinov, I. K. Kostadinov, Micromachining with copper bromide laser, 12th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Editors: P. A. Atanasov, A. A. Serafetinides, I. N. Kolev, *Proc. SPIE*, 5226, 372-376, 2003.
- [33]. I. I. Balchev, N. I. Minkovski, I. K. Kostadinov, N. V. Sabotinov, High-speed Laser Micromachining with Copper Bromide Laser, *ArXiv.org*, 2006, 17 p. <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0603/0603008.pdf>
- [34]. I. Balchev, N. Minkovski, Ts. Marinova, M. Shipochka, N. Sabotinov, Composition and structure characterization of aluminum after laser ablation, *Materials Science and Engineering: B*, 135 (2), 108–112, 2006. DOI: 10.1016/j.mseb.2006.08.042
- [35]. Н. А. Лябин, В. М. Жариков, В. И. Клименко и др., Лазеры на парах меди и их применение в технологии прецизионной обработки, *Электрон. техн., Сер. I*, N 2, 17-35, 2003.
- [36]. H. Bergmann, R. Salimbeni, N. Sabotinov, J. Mizeraczyk, C. Wallimann, I. Kostadinov, Development of a System Based on a High Power and High Efficiency Copper Bromide Laser for Precision Materials Processing, Project NATO SfP – 972685, „NATO SfP – Copper Bromide Laser”, Final Report, November 2002.
- [37]. B. Warner, Atomic vapour laser isotope separation, *Proc. SPIE*, 737, pp. 2-6, 1998.
- [38]. С. И. Яковленко, О лазерном разделении редких изотопов, *Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Серия Б: Справочные приложения, базы и банки данных: Т. XI-4, Газовые и плазменные лазеры*, ред. С. И. Яковленко, М., Физматлит, 764-811, 2005.
- [39]. S. E. Roozmeh, M. M. Tehranchi, M. Ghanaatshoar, S. M. Mohseni, M. Parhizkari, H. Ghomi, H. Latifi, Magnetoimpedance effect in laser annealed Co<sub>68.25</sub>Fe<sub>4.5</sub>Si<sub>12.25</sub>B<sub>15</sub>Co<sub>68.25</sub>Fe<sub>4.5</sub>Si<sub>12.25</sub>B<sub>15</sub> amorphous ribbons, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304 (2), e633-e655, 2006. *Proc. 17th Int. Symposium on Soft Magnetic Materials*.

- [40]. I. Balchev, N. Minkovski, P. Stefanov, M. Shipochka, N. Sabotinov, CuBr laser treatment of titanium wafers, Proc. of SPIE, 14th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Eds. P. A. Atanasov, T. N. Dreischuh, S. V. Gateva, L. M. Kovachev, 6604, pp. 66040X, 2007.
- [41]. Z. Lei, Q. Liejia, Z. Guiyan, S. Xiudong, L. Fucheng, Generation of 30ps pulse from a short cavity dye laser pumped by a copper bromide laser, Chinese Phys. Lett. 7, 300-303, 1990.
- [42]. X. Zureng, Z. Guiyan, L. Fucheng, Applications of the CuBr vapor laser as an image-brightness amplifier in high-speed photography and photomicrography, Appl. Opt. 31, 3395-3397, 1992.
- [43]. G. S. Evtushenko, V. Yu. Kashaev, N. V. Parshina, V. B. Sukhanov, V. V. Tatur, Light-dynamic systems based on copper bromide vapor laser, Proc. SPIE, 4900, 1126-1129, 2002.
- [44]. D. Stoyanov, I. Grigorov, G. Kolarov, Z. Peshev, T. Dreischuh, LIDAR Atmospheric Sensing by Metal Vapor and Nd:YAG Lasers, Advanced Photonic Sciences, M. Fadhali (Ed.), InTech, 2012. DOI: 10.5772/29325. Available from: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/33205/InTech-Lidar\\_atmospheric\\_sensing\\_by\\_metal\\_vapor\\_and\\_nd\\_yag\\_lasers.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/33205/InTech-Lidar_atmospheric_sensing_by_metal_vapor_and_nd_yag_lasers.pdf)
- [45]. M. V. Trigub, V. E. Zuev, G. S. Evtushenko, F. A. Gubarev, S. N. Torgaev, High-speed process visualization using CuBr-laser, Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2012 IEEE 13th International Conference and Seminar of Young Specialists on, 260-263, 2012.
- [46]. Laser Show Software for Advertising and Entertainment applications, [http://www.internatlaser.com/laser\\_software/index.htm](http://www.internatlaser.com/laser_software/index.htm)
- [47]. L. Lazov, A. Atanasov, N. Angelov, Investigation of the role of certain factors affecting the contrast in laser marking, Contemporary Materials II, 1, 13-17, 2011.
- [48]. Pulslight – Laser systems and Laser marking, София, <http://pulslight.net>, <http://pulslight.net/about-us/>
- [49]. Фирма ЕТ „Лазер продукт“, Лазерна шоу система DLS2001, базирана на лазер с меден бромид, София, [http://www.laser-product.com/laser-show\\_bg.html](http://www.laser-product.com/laser-show_bg.html)
- [50]. <http://www.optela.com/>
- [51]. Институт „Сатура“ АД, <http://www.saturaad.com/>
- [52]. В. Т. Карпухин, М. М. Маликов, Использование лазера на парах меди для получения ультрафиолетового излучения, Оптика атмосферы и океана, Т. 11 (2-3), 181-186, 1998.
- [53]. N. Vuchkov, High discharge tube resource of the Uv Cu+ Ne-CuBr laser and some applications, In: New Development in Lasers and Electric-Optics Research, ed. W. T. Arkin, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2007, 41-74.
- [54]. N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, N. V. Sabotinov, UV laser system for materials processing, The Journal of the Bulgarian Academy of Sciences, 1, 39-41, 2006, in Bulgarian.
- [55]. K. Beev, K. Temelkov, N. Vuchkov, Tz. Petrova, V. Dragostinova, R. Stoycheva-Topalova, S. Sainov, N. Sabotinov, Optical properties of polymer films for near UV recording, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 7, 1315-1318, 2005.
- [56]. M. Ilieva, V. Tsakova, N. Vuchkov, K. Temelkov, N. Sabotinov, UV copper ion laser treatment of poly-3,4- ethylenedioxythiophene, J. Optoelectr. and Advanced Materials, 9, 303-306, 2007.
- [57]. G. M. Peavy, L. Reinisch, G. T. Rayne, V. Venugopalan, Comparison of corticalbone ablations by using infrared laser wavelength 2.9 to 9.2 mm. Lasers Surg. Med., 25, 421-434, 1999.
- [58]. J. M. Auerhammer, R. Walker, A. F. G. van der Meer, B. Jean, Dynamic behavior of photoablation products of corneal tissue in the mid-IR: a study with FELIX. Appl. Phys B: Lasers Opt., 68, 111-119, 1999.
- [59]. A. V. Platonov, A. N. Soldatov, A. G. Filonov, Pulsed Strontium Vapor Laser, Sov. J. Quantum Electron., 8, 120-121, 1978.

- [60]. A. N. Soldatov, A. G. Filonov, A. S. Shumeiko, A. E. Kirilov, B. Ivanov, R. Haglund, M. Mendenhall, B. Gabella, I. Kostadinov, A Sealed-Off Strontium Vapor Laser, Proc. of SPIE, 5483, 252-261, 2004.
- [61]. B. L. Pan, Z. X. Yao, G. Chen, A discharge -excited SrBr<sub>2</sub> vapour laser. Chin. Phys. Lett., 19 (7), 941–943, 2002.
- [62]. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, B. L. Pan, N. V. Sabotinov, B. Ivanov, L. Lyutov, Strontium atom laser excited by nanosecond pulsed longitudinal He-SrBr<sub>2</sub> discharge, Journal of Phys. D: Appl. Phys. 39, 3769-3772, 2006.
- [63]. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, B. L. Pan, N. V. Sabotinov, B. Ivanov, L. Lyutov, Strontium bromide vapor laser excited by nanosecond pulsed longitudinal discharge. Proc. of SPIE, 6604, 660410, 1-5, 2007,
- [64]. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, I. Freijo-Martin, A. Lema, L. Lyutov, N. V. Sabotinov, Experimental study on the spectral and spatial characteristics of a high- power He-SrBr<sub>2</sub> laser. J. Phys. D:Appl.Phys. 42; 115105(6pp), 1-6, 2009.
- [65]. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, B. Mao, E. P. Atanasov, L. Lyutov, N. V. Sabotinov. Nigh-Power Atom Laser Excited in Nanosecond Pulsed Longitudinal He-SrBr<sub>2</sub> Discharge. IEEE J. Quant. Electron., 45 (3), 278-281, 2009.
- [66]. D. C. Montgomery, G. C. Runger, Applied statistics and probability for engineers, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- [67]. A. J. Izenman, Modern Multivariate Statistical Techniques: Regression, Classification, and Manifold Learning, Springer, New York, 2008.
- [68]. Yu. P. Raizer, M. N. Schneider, N. A. Yatsenko, Radio-Frequency Capacitive Discharges, CRC, New York, 1995. (Ю. П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко, Высокочастотный емкостный разряд, МФТИ, Москва, 1995).
- [69]. В. М. Батенин, П. А. Бохан, В. В. Бучанов, Г. С. Евтушенко, М. А. Казарян, И. И. Климовский, В. Т. Карпухин, М. М. Маликов, Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Том 2, Изд. Физматлит, 2011. [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_71782](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_71782)
- [70]. A. Bogaerts, R. Gijbels, Numerical modelling of gas discharge plasmas for various applications, Vacuum, 69 (1-3), 37-52, 2002.
- [71]. A. Bogaerts, K. De Bleecker, V. Georgieva, D. Herrebout, I. Kolev, M. Madani, E. Neyts, Numerical modeling for a better understanding of gas discharge plasmas, High Temperature Material Processes, 9 (3), 321-344, 2005.
- [72]. R. J. Carman, A time-dependent two electron group model for a discharge excited He-Sr recombination laser, J. Phys. D: Appl. Phys. 24, 1803-1810, 1991.
- [73]. C. E. Little, Pulsed Metal Vapour Lasers, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [74]. C. E. Little, Metal vapour ion lasers: Kinetic processes and gas discharges, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [75]. В. В. Рыбкин, Моделирование низкотемпературной плазмы газового разряда пониженного давления, 1999. [http://main.isuct.ru/files/konf/plasma/LECTIONS/Rybkin\\_lecture.html](http://main.isuct.ru/files/konf/plasma/LECTIONS/Rybkin_lecture.html)
- [76]. M. J. Withford, D. J. W. Brown, R. P. Mildren, R. J. Carman, G. D. Marshall, J. A. Piper, Advances in copper laser technology: kinetic enhancement, Progress in Quantum Electronics, 28 (3-4), 165-196, 2004.
- [77]. О. В. Жданеев, Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой, Кандидатская диссертация, Томск, ИОФ СО РАН, М. ИОФ РАН, 2004, 231 с.
- [78]. А. М. Бойченко, Моделирование лазеров и ламп на переходах эксиплексных и эксимерных молекул и лазеров на парах меди с модифицированной кинетикой (по материалам докторской диссертации), ИОФ РАН, Москва, 2005, 45 с.

- [79]. M. J. Kushner, A self-consistent model for high repetition rate copper vapor lasers, *J. Quant. Elect.* QE-17, 1555-1565, 1981.
- [80]. M. J. Kushner, B. E. Warner, Large bore copper vapor lasers: Kinetics and scaling issues, *J. Appl. Phys.* 54 (6), 2970-2982, 1983.
- [81]. R. J. Carman, D. J. W. Brown, J. A. Piper, A self-consistent model for the discharge kinetics in a high-repetition-rate copper-vapor laser, *IEEE J. Quant. Electron.*, 30 (8), 1876-1895, 1994.
- [82]. R. J. Carman, Modelling of the kinetics and parametric behaviour of a copper vapour laser: Output power limitation issues, *J. Appl. Phys.*, 82, 71-83, 1997.
- [83]. R. J. Carman, R. P. Mildren, M. J. Withford, D. J. W. Brown, J. A. Piper, Modeling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapor laser utilizing HCl+H<sub>2</sub> admixtures, *IEEE J. Quant. Electron.*, 36 (4), 438-449, 2000.
- [84]. R. J. Carman, M. J. Withford, D. J. W. Brown, J. A. Piper, Influence of the pre-pulse plasma electron density on the performance of elemental copper vapour lasers, *Optics Communications*, 157 (1-6), 99-104, 1998.
- [85]. M. J. Withford, Investigations of the effect of trace impurities on copper vapour laser performance, PhD Dissertation, Macquarie University, Sydney, Australia, 1995.
- [86]. C. Cheng, W. Sun, A kinetic model and study of CuBr pulsed lases, *Acta Physica Sinica*, 41 (10), 1605-1612, 1992.
- [87]. T. Ma, Analysis of gas temperature radial distribution in Ne-H<sub>2</sub>-CuBr laser discharge tube with diaphragms, *Yingyong guangxue (Journal of Applied Optics)*, 27(1), 54-57, 2006. <http://www.yygx.net/EN/abstract/abstract9128.shtml>
- [88]. T. Ma, Dynamic plasma characteristics in the CuBr laser discharge tube in different circuit, *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 23 (1), 46-49, 2006.
- [89]. D. L. Yu, R. W. Wang, Y. X. Tao, Кинетический анализ лазера на парах меди на трубках с большим диаметром, *Wuli xuebao*, 49 (2), 247-251, 2000.
- [90]. D. L. Yu, R. W. Wang, Y. X. Tao, Physical simulation for large-bore copper vapor laser, *Chin. Phys. Lett.*, 17, (1), 19-21, 2000.
- [91]. B. L. Pan, G. Chen, B. N. Mao, Z. X. Yao, Kinetic process of UV Cu<sup>+</sup> laser in Ne-CuBr longitudinal pulsed discharge, *Opt. Express* 14, 8644-8653, 2006.
- [92]. B. N. Mao, G. Chen, Y. B. Wang, L. Chen, B. L. Pan, Численное изучение влияния параметров на работу УФ Ne-CuBr-лазера в продольном импульсном разряде, *Wuli xuebao*, 56 (6), 2652-2656, 2007.
- [93]. B. N. Mao, B. L. Pan, L. Chen, Y. J. Wang, Z. X. Yao, Kinetic analysis of the factors limiting the output power of the Ne-CuBr UV laser, *Chinese Phys. B*, 18, 1542-1546, 2009. 10.1088/1674-1056/18/4/041
- [94]. H. Ghomi, H. Latifi, Effect of an axial external magnetic field on the output of a CuBr-Ne laser, *Jap. J. Appl. Phys.*, Pt 1, 43 (2), 824-826, 2004. <http://jjap.ipap.jp/link?JJAP/43/824/>
- [95]. B. A. Ghani, M. Hammadi, Modeling the plasma kinetics mechanisms of CuBr laser with neon-hydrogen additives, *Opt. and Las. Technol.*, 38, 67-76, 2006. doi:10.1016/j.optlastec.2004.11.008
- [96]. А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин, Лазеры на парах меди, ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2005.
- [97]. П. А. Бохан, Н. А. Юдин, В. В. Бучанов, Д. Э. Закревский, М. А. Казарян, Влияние добавок водорода на характеристики лазера на парах меди, Сб. Докладов 7 Всероссийской (Международной) научной конференции “Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул”, Звенигород, 29 сент. – 4 окт. 2002, 251-255, 2002.
- [98]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, S. I. Yakovlenko, O. V. Zhdaneev, The influence of the initial density of metastable states and electron density on the pulse repetition rate in a copper-vapor laser, *Laser Physics, Springer*, 11 (5), 580-588, 2001.



- [99]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, O. V. Zhdaneev, S. I. Yakovlenko, Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen additions on the emission parameters of a copper vapor laser, *Quantum Electronics*, 33 (12), 1047-1058, 2003.
- [100]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, S. I. Yakovlenko, O. V. Zhdaneev, Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen admixtures on lasing characteristics of a copper-vapor laser, *Laser Physics*, Springer, 13 (10), 1231-1255, 2003.
- [101]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, S. I. Yakovlenko, O. V. Zhdaneev, Analysis of the effect of hydrogen impurities on the work of the active element of a Kristall LT-40 copper-vapor laser, *Laser Physics*, Springer, 14 (8), 1031-1035, 2004.
- [102]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, Simulation of a CuBr Laser in the Presence and in the Absence of Hydrogen Impurity, *Laser Physics*, Springer, 18 (4), 403-412, 2008.
- [103]. A. M. Boichenko, G. S. Evtushenko, S. N. Torgaev, Simulation of a CuBr laser, *Laser Physics*, Springer, 18 (12), 1522-1525, 2008.
- [104]. D. N. Astadjov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, Parametric study of the CuBr laser with hydrogen additives, *IEEE J. of Quant. Electr.*, 24 (9), 1926-1935, 1988.
- [105]. N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, P. V. Zahariev, N. V. Sabotinov, Optimization of a UV Cu<sup>+</sup> laser excited by pulse - longitudinal Ne-CuBr discharge, *IEEE J. Quantum Electron.*, 37(4), 511-517, 2001.
- [106]. И. П. Илиев, С. Г. Гочева-Илиева, Н. В. Саботинов, Аналитическое исследование температурного профиля лазера на бромиде меди. *Квантовая электроника*, 38 (4) 338-342, 2008.
- [107]. И. П. Илиев, С. Г. Гочева-Илиева, Н. В. Саботинов, Улучшенная модель температура газа в лазерах на парах меди, *Квантовая электроника*, 39 (5), 425-430, 2009.
- [108]. I. Iliev, G. Paskalev, Defining the temperature profile of metal vapor lasers analytically. *Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv "Fundamental Sciences and Applications"*, Vol. 14, 2009. *International Conference of Engineering, Technologies and Systems, TechSys '2009*, 485-490, 2009.
- [109]. И. П. Илиев, С. Г. Гочева-Илиева, Модель радиального распределения температуры газа в лазере на парах бромиде меди, *Квантовая электроника*, 40 (6), 479-483, 2010.
- [110]. I. Iliev, S. Gocheva-Ilieva, Numerical study of gas temperature distribution in a copper bromide laser active medium, *Fourth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences*, St. Constantine and Helena, Varna, Bulgaria, June 11-16, 2012, Editor: Michail D. Todorov, *AIP Conf. Proc.* CP1487, 185-192, 2012.
- [111]. S. G. Gocheva-Ilieva, I. P. Iliev, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, Analytical model of the temperature in UV Cu<sup>+</sup> CuBr laser. *The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08)*, June 6 - 12, 2008, Sozopol, Conf. Proc. American Institute of Physics, CP1067, edited by M. D. Todorov, Melville NY: American Institute of Physics, 114-121, 2008.
- [112]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, Modeling of the radial heat flow and cooling processes in a deep ultraviolet Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr laser. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2009, Article ID 582732, 17 pages, 2009.
- [113]. I. Iliev, Gas temperature model of ultraviolet copper laser, *Engineering Sciences*, XLIX, No. 1, Sofia, Bulgarian Academy of Sciences. 39-48, 2012.
- [114]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, Analytical model of temperature profile for a He-SrBr<sub>2</sub> laser. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11 (11), 1735 - 1742, 2009.
- [115]. I. Iliev, S. Gocheva-Ilieva, K. Temelkov, N. Vuchkov, N. Sabotinov, Temperature model of high-powered SrBr<sub>2</sub> laser, *2nd Int. Conf. Application of mathematics in technical and natural sciences*,

- Sozopol, 21-26.06.2010, Eds. M.D. Todorov and C.I. Christov, AIP Conf. Proc., 1301, 138-145, 2010.
- [116]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, An improved radial temperature model of a high-powered He-SrBr<sub>2</sub> laser. *Optics and Laser Technology*, Elsevier, 43 (3), 642-647, 2011.
- [117]. I. P. Iliev, Temperature Analysis for Designing a New High-Powered Strontium Bromide Laser, *Int. J. Sci. & Technol. Res.* 2 (2) 133-137, 2013.
- [118]. Gocheva-Ilieva S.G., Iliev, I.P., Statistical models of characteristics of metal vapor lasers, Nova Science Publishers Inc., New York, 2011, p.194.
- [119]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, Mathematical modeling of the electric field in copper bromide laser, ICNAAM 2007, Corfu, Greece, September 16-20, 2007, Conference Proceedings of American Institute of Physics (AIP), CP936, 527-530, 2007.
- [120]. J. L. Lu, L. J. Wang, The orthonormal design of experiments for the optimization of the parameters of the discharge circuit in the CuBr vapour lasers power supply, *Laser Technology*, 30 (02), 113-115, 2006.
- [121]. C. Cheng, S. He, An optimal design for reducing the black center for a copper-vapor laser by using a genetic algorithm, *Microwave and Optical Technology Letters*, 25 (2), 113 – 119, 2000.
- [122]. C. Cheng, Plasma kinetics mechanisms of an optimized copper vapour laser, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 33, 1169-1178, 2000.
- [123]. C. Cheng, S. He, On the optimization of laser power, efficiency and impedance matching for a copper vapor laser, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 27, 339-343, 2000.
- [124]. C. Cheng, S. L. He, Optimal design for a copper vapor laser with a maximum output by using a genetic algorithm, *Optical and Quantum Electronics*, 33, 83-98, 2001.
- [125]. C. Cheng, F. Zhuang, Изучение механизмов усиления оптимизированного лазера на парах меди, *Wuli xuebao*, vol. 50, N 3, pp. 478-482, 2001.
- [126]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, Statistical techniques for examining copper bromide laser parameters, *Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics*, ICNAAM 2007, Corfu, Greece, September 16-20, 2007, Conference Proceedings of American Institute of Physics (AIP), CP936, 267-270, 2007.
- [127]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, D. N. Astadjov, N. P. Denev, N. V. Sabotinov, Statistical approach in planning experiments with a copper bromide vapor laser, *Quantum Electronics*, 38 (5), 436-440, 2008.
- [128]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, On the application of the multidimensional statistical techniques for exploring copper bromide vapor laser. The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08), June 6 - 12, 2008, Sozopol, Conf. Proc. American Institute of Physics, CP1067, edited by M. D. Todorov, Melville NY: American Institute of Physics, 475-482, 2008.
- [129]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, N. V. Sabotinov, Prognosis of the Copper Bromide Laser Generation through Statistical Methods, XVII Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers 2008, Lisbon, Portugal, 15 - 19 September 2008, ed. R. Vidal et al., Proceedings of SPIE, 7131, SPIE, Bellingham, WA, 71311J1-J8, 2009.
- [130]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, N. V. Sabotinov, Classification analysis of CuBr laser parameters. *Quantum Electronics*, 39 (2), 143-146, 2009.
- [131]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, N. P. Denev, N. V. Sabotinov, Statistical Study of the Copper Bromide Laser Efficiency, Sixth Intern. Conf. of the Balkan Physical Union. August 22-26, 2006, Istanbul, Turkey, Proc. of American Institute of Physics (AIP), CP899, 680, 2007.

- [132]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, N. V. Sabotinov, On the statistical analysis of the copper bromide laser efficiency. *J. of the Tech. Univ. at Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications"*, Anniversary Sci. Conf. 2006, 13(10), 71-76, 2006.
- [133]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, D. N. Astadzhov, N. P. Denev, N. V. Sabotinov, Statistical analysis of the CuBr laser efficiency improvement, *Optics and Laser Technology*, 40 (4), 641-646, 2008.
- [134]. С. Г. Гочева-Илиева, И. П. Илиев, Параметрични модели на характеристиките на лазер с пари на меден бромид. Монография. Университетско издателство „Паисий Хилендарски“, Пловдив, 2010, 141 с.
- [135]. С. Панчев. Теория на хаоса. Акад. изд. "Акад. М. Дринов", София, 2001.
- [136]. Л. Ф. Черногор, О нелинейности в природе и науке, Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008.
- [137]. S. G. Gocheva-Ilieva, I. P. Iliev, Parametric and Nonparametric Empirical Regression Models: Case Study of Copper Bromide Laser Generation. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2010, Article ID 697687, 15 pages, 2010.
- [138]. N. Denev, I. Iliev, S. Gocheva-Ilieva, Second-Degree Polynomial Model of Laser Generation for a CuBr Laser, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 12 (4), 129-139, 2013.
- [139]. Н. Денев, И. Илиев, Нелинеен параметричен модел за изходната мощност на SuBr лазер, *J Technical University – Sofia, Plovdiv branch, "Fundamental Sciences and Applications "*, 17, 75-79, 2012.
- [140]. N. P. Denev, I. P. Iliev. Second degree model of laser efficiency of CuBr laser, Fifth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena, Bulgaria, June 24-29, 2013, *AIP Conf. Proc. CP1561*, 92-99, 2013.
- [141]. S. G. Gocheva-Ilieva, I. P. Iliev, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, Classifying the Basic Parameters of Ultraviolet Copper Bromide Laser, In: *Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences*, edited by M. D. Todorov and C. I. Christov, American Institute of Physics, AIP CP1186, 413-420, 2009.
- [142]. И. Илиев, Параметричен модел от втора степен за изходната лазерна генерация на UV Cu+ Ne-Cu лазер, *Journal of the Technical University – Sofia Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications"* 18, 53-58, 2012.
- [143]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, Study of UV Cu+ Ne - CuBr laser lifetime by statistical methods, *Quant. Electron.* 43(1), 1014-1018, 2013.
- [144]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, A Non-linear Parametric Second-Degree Model for the Lifetime of Ultraviolet Cu+ Ne-CuBr Laser, *Proc. 11th Intern. Conf. on Modeling, Simulation and Visualization Methods (MSV'14), WORLDCOMP'14 (World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing)*, Las Vegas, 21-24 July, 2014, Eds. H. R. Arabnia, L. Deligiannidis, J. You, CSREA Press, USA, pp. 52-56, 2014.
- [145]. I. P. Iliev, N. P. Denev, Parametric models of the third degree for output parameters of a CuBr laser, *Int J Scientific & Technology Research*, 3 (11), 28-31, November 2014.
- [146]. Iliycho Iliev. Multivariate Analysis for Investigating the Output characteristics of UV Cu + Ne-CuBr Laser. *Int J Scientific & Technology Research*, 3 (12) 14-20, December 2014.
- [147]. I. P. Iliev, D. S. Voynikova, S. G. Gocheva-Ilieva, Application of the classification and regression trees for modeling the laser output power of a copper bromide vapor laser, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 654845, 2013.
- [148]. I. P. Iliev, D. S. Voynikova, S. G. Gocheva-Ilieva, Simulation of the output power of copper bromide lasers by the MARS method, *Quantum Electronics*, 42 (4), 298-303, 2012.
- [149]. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, Modeling and simulation of output power of a high-power He-SrBr<sub>2</sub> laser by using multivariate adaptive regression splines. *Optics and Laser Technology*, Elsevier, Online 1 July 2012, 45 (1), 461-468, 2013.

- [150]. S. G. Gocheva-Ilieva, D. S. Voynikova, I. P. Iliev, Application of MARS for Modeling Local Nonlinear Relationships in Data on Ultraviolet Copper Ion Lasers, ICNPAA 2012 Congress: Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, Vienna, July 10, 2012 – July 14, 2012, AIP CP 1493, 416-423, 2012.
- [151]. S. G. Gocheva-Ilieva, Application of the Generalized PathSeeker regularized regression, Mathematics and Education in Mathematics, Proc. 43th Spring Conference of the Union of Bulgarian Mathematicians, 2-6 April 2014, Borovetz, Bulgaria, 34-43, 2014.
- [152]. L. Gacheva, M. Nenchev, M. Deneva, I. Iliev, A simple new competitive – amplifying technique for producing of laser emission locked at atomic absorption line, Proc. Intern. Symposium, 2005, Bulgaria, Proc. of LTL Plovdiv'05, International Symposium (2005), 293-298, 2005.
- [153]. C. D. Boley, W. A. Molander, B. E. Warner, Computational model of copper laser, Technical Report, Livermore, CA: University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 1997. DOI: 10.2172/641350
- [154]. G. G. Petrash, On the Simulation of a Copper Vapour Laser with Hydrogen Admixtures, Quantum Electronics, 35 (6), 576-577, 2005.
- [155]. S. I. Yakovlenko, Critical Electron Density in a Self-contained Copper Vapour Laser in the Restricted Pulse Repetition Rate, Quantum Electronics, 30 (6), 501-505, 2000.
- [156]. D. N. Astadjov, K. D. Dimitrov, D. R. Jones, V. K. Kirkov, C. E. Little, N. V. Sabotinov, et al. Copper bromide laser of 120-W average output power, IEEE J. Quantum Electronics, 33(5), 705–709, 1997.
- [157]. D. Astadjov, N. Sabotinov, Energy dissipation in the electrodes of CuBr laser-like discharges. J. or Appl. Phys. D: Appl. Phys. 30 (10), 1507-1514, 1977.
- [158]. M. Oprev, S. G. Batov and D. Z. Uzunov, Heat Technology, Technika, Sofia, 1978.
- [159]. M. N. Özişik, Heat Transfer. A Basic Approach, McGraw-Hill, Boston, 1985.
- [160]. Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Грогорьева, Е. З. Мейлихова, Энергоатомиздат, Москва, 1991.
- [161]. P. Blau, Impedance matching and electric field penetration in metal vapour lasers, In: Pulsed Metal Vapour Lasers, edited by E. Little and N.V. Sabotinov, Kluwer Academic publishers, 215-220, 1996.
- [162]. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш, Специальные функции. Издательство „Наука”, Москва, 1977.
- [163]. А. А. Самарский, Введение в теорию разностных схем. Наука, Москва, 1971.
- [164]. Б. Сендов, В. Попов, Числени методи – втора част, Изд. Наука и изкуство, София, 1978.
- [165]. N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, N. V. Sabotinov, UV Lasing on Cu<sup>+</sup> in a Ne-CuBr Pulsed Longitudinal Discharge, IEEE J. Quantum Electronics 35 (12), 1799-1804, 1999.
- [166]. N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, P. V. Zahariev, N. V. Sabotinov, Influence of the Active Zone Diameter on the UV-Ion Ne-CuBr Laser Performance, IEEE J. Quantum Electron., 35 (12), 1538-1546, 2001.
- [167]. N. K. Vuchkov, K. A. Temelkov, N. V. Sabotinov, Effect of Hydrogen on the Average Output of the UV Cu<sup>+</sup> Ne-CuBr Laser, IEEE J. Quantum Electron., 41 (1), 62-65, 2005.
- [168]. L. J. Slater, Generalized Hypergeometric Functions, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1966.
- [169]. Таблицы физических величин. Под редакцией И. К. Кикоина, Атомиздат, Москва, 1976, с. 1006.
- [170]. В. А. Милчев, Д. З. Узунов, В. Я. Йорданов, Д. К. Палов, Топлотехника. Техника, София, 1989, 258.
- [171]. T. P. Ryan, Modern engineering statistics, 2007, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2007.

- [172]. S. M. Ross, Introduction to probability and statistics for engineers and scientists, 3rd ed., Elsevier Academic Press, Amsterdam - New York, 2004.
- [173]. Engineering Statistics, NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, National Institute of Standards and Technology, USA, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
- [174]. D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 5th ed., Wiley, New York, 2001.
- [175]. D. N. Astadjov, K. D. Dimitrov, C. E. Little, N. V. Sabotinov, A CuBr laser with 1.4 W/cm<sup>3</sup> average output power, IEEE J. Quantum Electronics, 30 (6), 1358–1360, 1994.
- [176]. N. K. Vuchkov, D. N. Astadjov, N. V. Sabotinov, A new circuit for CuBr laser excitation, Opt. Quantum Electronics 23, S549–S553, 1991.
- [177]. N. V. Sabotinov, Copper bromide lasers. In: C. E. Little, N. V. Sabotinov, editors, Pulsed metal vapour lasers, NATO ASI series, Disarmament Technologies-5, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 113–124, 1996.
- [178]. K. D. Dimitrov, N. V. Sabotinov, High-power and high-efficiency copper bromide vapor laser, SPIE 3052, 126–130, 1996.
- [179]. D. N. Astadjov, K. D. Dimitrov, D. R. Jones, V. L. Kirkov, C. E. Little, N. Little, N. V. Sabotinov, et al. Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length, Opt. Commun. 135, 289–294, 1997.
- [180]. V. M. Stoilov, D. N. Astadjov, N. K. Vuchkov, N. V. Sabotinov, High spatial intensity 10 W–CuBr laser with hydrogen additives, Opt. Quantum Electron., 32, 1209–1217, 2000.
- [181]. NATO contract SFP, 97 2685 (50W copper bromide laser), 2000.
- [182]. N. P. Denev, D. N. Astadjov, N. V. Sabotinov, Analysis of the copper bromide laser efficiency, In: Proceedings of fourth international symposium on laser technologies and lasers '2005, Plovdiv, Bulgaria, p. 153–156, 2006.
- [183]. A. C. Rencher, Methods of multivariate analysis, 2nd ed., John Wiley, New York, 2002.
- [184]. A. Field, Discovering statistics using SPSS, 3<sup>rd</sup> ed., Sage Publication Inc., Los Angeles, 2009.
- [185]. W. Janssens, K. Wijnen, P. De Pelsmacker, P. Van Kenhove, Marketing research with SPSS, Prentice Hall, Pearson Education Ltd, Harlow, 2008.
- [186]. Г. Моосмюллер, Н. Н. Ребик, Маркетинговые исследования с SPSS, М. ИНФРА – М, 2007.
- [187]. Д. Гоев, Статистическа обработка и анализ на информацията от социологически, маркетингови и политически изследвания със SPSS, Унив. изд. “Стопанство”, 1996.
- [188]. J. Kim, Ch. W. Mueller, Factor analysis: Statistical Methods and Practical Issue, Eleventh Printing, Sage Publication Inc., 1986.
- [189]. А. Манов, Статистика със SPSS, изд. Тракия, София, 2001.
- [190]. Д. Л. Въндев, Записки по приложна статистика 1, СУ “Св. Кл. Охридски”, София, 2003.
- [191]. I. T. Jolliffe, Principal component analysis, 3rd edn. Springer, New York, 2002.
- [192]. S. Weisberg, Applied linear regression, 3rd ed., Wiley-Interscience, Series in Probability and Statistics, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [193]. M. S. Aldenderfer, R. K. Blanshfield, Cluster Analysis, Sage Publication Inc., Iowa, 1984.
- [194]. V. A. Epanechnikov, Non-Parametric Estimation of a Multivariate Probability Density", Theory Probab. Appl., 14 (1), 153–158, 1969.
- [195]. S.G. Gocheva-Ilieva, I.P. Iliev, Nonlinear regression model of copper bromide laser generation, Proceedings of COMPSTAT'2010, Eds. Y. Lechevallier, G. Saporta, 19th International Conference on Computational Statistics, Paris - France, August 22-27, 2010, Physica-Verlag, Springer\_ebook, pp. 1063-1070, 2010.

## Публикации, свързани с дисертацията

- [D1] И.П. Илиев, С.Г. Гочева-Илиева, Н.В. Саботинов. Аналитическое исследование температурного профиля лазера на бромиде меди. Квантовая электроника, 38, № 4, 2008, 338-342. **IF: 0.835, SJR (Scientific Journal Ranking) =0.463**
- [D2] И.П. Илиев, С.Г. Гочева-Илиева, Н.В. Саботинов. Улучшенная модель температура газа в лазерах на парах меди. Квантовая электроника, 39, № 5, 2009, 425-430. **IF: 0.791, SJR=0.439**
- [D3] I. Iliev, G. Paskalev. Defining the temperature profile of metal vapor lasers analytically. Journal of the Techn. Univ. Sofia, branch Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 14, 2009. International Conference on Engineering, Technologies and Systems TechSys '2009, 485-490.
- [D4] И.П. Илиев, С.Г. Гочева-Илиева. Модель радиального распределения температуры газа в лазере на парах бромида меди. Квантовая электроника, 40, № 6, 2010, 479-483. **IF: 0.802, SJR=0.417**
- [D5] Iliev I., S. Gocheva-Ilieva, Numerical study of gas temperature distribution in a copper bromide laser active medium, Fourth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, St. Constantine and Helena, Varna, Bulgaria, June 11-16, 2012, Editor: Michail D. Todorov, AIP Conf. Proc. 1487, pp. 185-192, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4758957>, SCOPUS, **SJR=0.168**
- [D6] Gocheva-Ilieva S.G., I.P. Iliev, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov, N.V. Sabotinov. Analytical model of the temperature in UV Cu+ CuBr laser. The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08), June 6 - 12, 2008, Sozopol, Conf. Proc. American Institute of Physics, CP1067, edited by M. D. Todorov, Melville NY: American Institute of Physics, pp. 114-121, 2008. SCOPUS, **SJR=0.152**.
- [D7] Iliev I.P., S.G. Gocheva-Ilieva, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov and N.V., Sabotinov. Modeling of the radial heat flow and cooling processes in a deep ultraviolet Cu+ Ne-CuBr laser. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2009, Article ID 582732, 17 pages, 2009. **IF: 0.553, SJR=0.250**
- [D8] I. Iliev. Development of the gas temperature model for Cu+ Ne-CuBr laser, Engineering Sciences, XLVIII, 2012, No. 1, Sofia, Bulgarian Academy of Sciences. 101-110.
- [D9] Iliev I.P., S.G. Gocheva-Ilieva, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov and N.V. Sabotinov. Analytical model of temperature profile for a He-SrBr<sub>2</sub> laser. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol.11, ISS.11, pp. 1735 - 1742, 2009. **IF: 0.433, SJR=0.250**  
<http://inoe.inoe.ro/joam/index.php?option=magazine&op=view&idu=2224&catid=44>
- [D10] I. Iliev, S. Gocheva-Ilieva, K. Temelkov, N. Vuchkov, N. Sabotinov, Temperature model of high-powered SrBr<sub>2</sub> laser, 2nd Int. Conf. Application of mathematics in technical and natural sciences, Sozopol, 21-26.06.2010, Eds. M.D. Todorov and C.I. Christov, AIP Conf. Proc., November 25, 2010, Vol. 1301, pp. 138-145, 2010. DOI: 0.1063/1.3526607 SCOPUS, **SJR=0.148**
- [D11] Iliev I.P., S.G. Gocheva-Ilieva, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov and N.V. Sabotinov. An improved radial temperature model of a high-powered He-SrBr<sub>2</sub> laser. Optics and Laser Technology, Elsevier, vol. 43, N 3, pp. 642-647, 2011. **IF: 1.515, SJR=0.657**  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.09.005>
- [D12] I.P. Iliev, Temperature Analysis for Designing a New High-Powered Strontium Bromide Laser, Int. J Sci. & Technology and Research, vol. 2, no 2, 2013, pp. 133-137. ISSN 2277-8616.  
<http://www.ijstr.org/final-print/feb2013/Temperature-Analysis-For-Designing-A-New-High-powered-Strontium-Bromide-Laser.pdf>
- [D13] I.P. Iliev and S.G. Gocheva-Ilieva, Statistical techniques for examining copper bromide laser parameters, Conference Proceedings of American Institute of Physics (AIP), vol. CP936, pp. 267-270, 2007. Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2007, Corfu, Greece, September 16-20, 2007, SCOPUS, **SJR=0.154**
- [D14] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva, D.N. Astadjov, N.P. Denev and N.V. Sabotinov, Statistical approach in planning experiments with copper a bromide vapor laser, Quantum Electronics, vol. 38, N 5, 436-440, 2008. **IF: 0.835, SJR=0.463**
- [D15] Iliev I.P., S. G. Gocheva-Ilieva. On the application of the multidimensional statistical techniques for exploring copper bromide vapor laser. The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08), June 6 - 12, 2008, Sozopol, Conf. Proc. American Institute of Physics, CP1067, edited by M. D. Todorov, Melville NY: American Institute of Physics, pp. 475-482, 2008. SCOPUS, **SJR=0.152**



- [D16] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva and N.V. Sabotinov, Prognosis of the Copper Bromide Laser Generation through Statistical Methods, XVII Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers 2008, Lisbon, Portugal, 15 - 19 September 2008, ed. R. Vidal et al., Proceedings of SPIE, 7131, SPIE, Bellingham, WA, 71311J1-J8, 2009. **SCOPUS, SJR=0.225**
- [D17] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva, N.V. Sabotinov. Classification analysis of CuBr laser parameters. Quantum Electronics, vol. 39, N2, pp. 143-146, 2009, **IF: 0.791; SJR=0.439**
- [D18] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva, N.P. Denev and N.V. Sabotinov, Statistical Study of the Copper Bromide Laser Efficiency, Proc. of American Institute of Physics (AIP), p. 680, vol. 899 - Sixth Intern. Conf. of the Balkan Physical Union. August 22-26, 2006, Istanbul, Turkey **SCOPUS, SJR=0.154**
- [D19] Iliev I.P., S.G. Gocheva-Ilieva, N.V. Sabotinov. On the statistical analysis of the copper bromide laser efficiency. J. of the Tech. Univ. at Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Anniversary Sci. Conf. 2006, vol. 13(10), pp. 71-76, 2006.
- [D20] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva, D.N. Astadzhov, N.P. Denev and N.V. Sabotinov, Statistical analysis of the CuBr laser efficiency improvement, Optics and Laser Technology, Elsevier, vol. 40, issue 4, pp. 641-646, 2008. IF: 0.892, **SJR=0.486**
- [D21] Gocheva-Ilieva S.G., Iliev, I.P., *Statistical models of characteristics of metal vapor lasers*, Nova Science Publishers Inc., New York, 2011, p.194. **SCOPUS, <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=18036973800>**
- [D22] С.Г. Гочева-Илиева, И.П. Илиев. Параметрични модели на характеристиките на лазер с пари на меден бромид. Монография. Пловдив 2010, Университетско издателство „Паисий Хилендарски”, 141 с.
- [D23] S.G. Gocheva-Ilieva, I. P. Iliev. Parametric and Nonparametric Empirical Regression Models: Case Study of Copper Bromide Laser Generation. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2010, ID 697687, 15 pages doi:10.1155/2010/697687, **IF: 0.689, SJR=0.235**
- [D24] Denev N., I. Iliev, S. Gocheva-Ilieva, Second-Degree Polynomial Model of Laser Generation for a CuBr Laser, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 4, Vol. 12, April 2013, <http://www.wseas.org/multimedia/journals/circuits/2013/035701-103.pdf> **SCOPUS, SJR= 0.177**
- [D25] Н. Денев, И. Илиев, Нелинеен параметричен модел за изходната мощност на SuBr лазер, J Technical University – Sofia, Plovdiv branch, "Fundamental Sciences and Applications ", Vol. 17, p. 75-79, 2012.
- [D26] N.P. Denev, I.P. Iliev. Second degree model of laser efficiency of a CuBr laser. Fifth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena, Bulgaria, June 24-29, 2013, AIP Conference Proceedings, 1561, 92-99 (2013). doi:10.1063/1.4827218. AIP Publishing LLC 978-0-7354-1189-0. **SCOPUS, SJR=0.162**
- [D27] S.G. Gocheva-Ilieva, I.P. Iliev, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov and N.V. Sabotinov Classifying the Basic Parameters of Ultraviolet Copper Bromide Laser. CP 1186, Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, edited by M.D. Todorov and C.I. Christov, 2009, American Institute of Physics 987-0-7374-0752-7/09, 413-420. **SCOPUS, SJR=0.148**
- [D28] И. Илиев. Параметричен модел от втора степен за изходната лазерна генерация на UV Cu+ Ne-Cu лазер. Journal of the Technical University – Sofia Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications" Vol. 18, 2012, 53-58.
- [D29] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva. Study of UV Cu+ Ne - CuBr laser lifetime by statistical methods. Quantum Electronics, 43(1), 1014-1018, 2013. **IF: 0.886, SJR=0.655**
- [D30] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., A Non-linear Parametric Second-Degree Model for the Lifetime of Ultraviolet Cu+ Ne-CuBr Laser, Proc. 11th Intern. Conf. on Modeling, Simulation and Visualization Methods (MSV'14), WORLDCOMP'14 (World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing), Las Vegas, 21-24 July, 2014, pp. 52-56, Eds. Arabnia H.R., Deligiannidis L., You J., CSREA Press, USA. ISBN: 1-60132-281-X
- [D31] I.P. Iliev, N.P. Denev, Parametric models of the third degree for output parameters of CuBr laser. Int J Scientific & Technology Research, 3 (11), November 2014, 28-31.
- [D32] Iliycho Iliev, Multivariate Analysis for Investigating the Output characteristics of UV Cu + Ne-CuBr Laser. Int J Scientific & Technology Research, 3 (12) December 2014, 14-20.
- [D33] S.G. Gocheva-Ilieva, I.P. Iliev, Nonlinear regression model of copper bromide laser generation, Proceedings of COMPSTAT'2010, Eds. Y. Lechevallier, G. Saporta, 19th International Conference on Computational Statistics, Paris - France, August 22-27, 2010, Physica-Verlag, Springer\_ebook, pp. 1063-1070.

## Апробация на получените резултати

### Доклади на конференции

- D3. Iliycho Iliev, Georgi Paskalev. Defining the temperature profile of metal vapor lasers analytically. International Conference Engineering, Technologies and Systems”, TechSys ‘2009 Technical University Sofia, branch Plovdiv, Plovdiv, 29-30.05.2009.
- D5. Iliev I., S.Gocheva-Ilieva, Numerical study of gas temperature distribution in a copper bromide laser active medium, Fourth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, St. Constantine and Helena, Varna, Bulgaria, June 11-16, 2012. SCOPUS, **SJR=0.168.**
- D6. Gocheva-Ilieva S.G., I.P. Iliev, K.A. Temelkov, N.K. Vuchkov, N. V. Sabotinov. Analytical model of the temperature in UV Cu+ CuBr laser. The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08), June 6 - 12, 2008, Sozopol, Bulgaria. SCOPUS, **SJR=0.152.**
- D10. I.Iliev, S. Gocheva-Ilieva, K. Temelkov, N. Vuchkov, N. Sabotinov, Temperature model of high-powered SrBr<sub>2</sub> laser, 2nd Int. Conf. Application of mathematics in technical and natural sciences, Sozopol, 21-26.06.2010. SCOPUS, **SJR=0.148**
- D13. I.P. Iliev and S. G. Gocheva-Ilieva, Statistical techniques for examining copper bromide laser parameters, Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2007, **Corfu, Greece**, September 16-20, 2007, SCOPUS, **SJR=0.154**
- D15. Iliev I.P., S. G. Gocheva-Ilieva. On the application of the multidimensional statistical techniques for exploring copper bromide vapor laser. The 34th Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'08), June 6 - 12, 2008, Sozopol, Bulgaria. SCOPUS, **SJR=0.152**
- D16. I.P. Iliev, Snezhana G. Gocheva-Ilieva and Nikola V. Sabotinov, Prognosis of the Copper Bromide Laser Generation through Statistical Methods, XVII Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers 2008, **Lisbon**, Portugal, 15 - 19 September 2008. SCOPUS, **SJR=0.225**
- D18. I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva, N. P. Denev and N. V. Sabotinov, Statistical Study of the Copper Bromide Laser Efficiency, Sixth Intern. Conf. of the Balkan Physical Union. August 22-26, 2006, **Istanbul**, Turkey, SCOPUS, **SJR=0.154**
- D19. Iliev I. P., S. G. Gocheva-Ilieva, N. V. Sabotinov. On the statistical analysis of the copper bromide laser efficiency., Tech. Univ. at Plovdiv Anniversary Sci. Conf.'2006, 2006.
- D26. N. P. Denev, I.P. Iliev. Second degree model of laser efficiency of a CuBr laser. Fifth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena, Bulgaria, June 24-29, 2013, SCOPUS, **SJR=0.162**
- D27. S. G. Gocheva-Ilieva, I. P. Iliev, K. A. Temelkov c, N. K. Vuchkov and N. V. Sabotinov Classifying the Basic Parameters of Ultraviolet Copper Bromide Laser. 1st International Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, AMiTaNS-09, Sozopol, Bulgaria, 22-27 June 2009, SCOPUS, **SJR=0.148**
- D30. Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., A Non-linear Parametric Second-Degree Model for the Lifetime of Ultraviolet Cu+ Ne-CuBr Laser, Proc. 11th Intern. Conf. on Modeling, Simulation and Visualization Methods (MSV'14), WORLDCOMP'14 (World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing), **Las Vegas**, USA, 21-24 July, 2014.
- D33. S.G.Gocheva-Ilieva, I.P.Iliev, Nonlinear regression model of copper bromide laser generation, Proceedings of COMPSTAT'2010, Eds. Y. Lechevallier, G. Saporta, 19th International Conference on Computational Statistics, **Paris** - France, August 22-27, 2010.



**Статии, включени в дисертацията и публикувани с финансовото съдействие на следните проекти**

№	Тема на договора	Период на договора	Публикация, включена в дисертационния труд
1	Проект № 444/12.06.2006: „Компютърно изследване на процесите в газовия разряд и активната лазерна среда”. Технически университет - Филиал Пловдив	2006	D19
2	Проект НФИУ 10000, 2010, Технически университет-София	2010	D10
3	Проект ИУ НФ 13000, 2013, Технически университет-София	2013	D26
4	Проект N07 M07/2007-2008:” Математическо и информационно моделиране на импулсни и газови лазери “; НПД при ПУ “Паисий Хилендарски”.	2007-2008	D1,D6,D13,D14, D15,D16,D17
5	Проект: ИС-М4, „Междуфакултетен разпределен център за електронно обучение“, НПД при ПУ “Паисий Хилендарски”.	2008-2010	D22
6	Проект N09 M013: „Статистически и математически модели в планиране на експеримента с подобрени изходни характеристики за лазери с пари на металите”. НПД при ПУ “Паисий Хилендарски”.	2009-2010	D2,D3,D4,D9,D10, D11,D22,D23
7	Научен проект към Национален фонд научни изследвания, МОН, ВУ-МИ-205/2006-2009: „Разработка на софтуерни продукти за компютърна симулация на газовия разряд с приложение в малки и средни предприятия”.	2006-2009	D1,D2, D3,D4, D6,D7,D9,D10, D11, D13,D14, D15,D16,D17, D19,D20,D23
8	Проект НИ11-ФМИ-004, „Разработка и приложение на иновативни ИКТ за провеждане на качествени конкурентоспособни научни изследвания и цялостно осъвременяване процеса на обучение във ФМИ“, НПД при ПУ “Паисий Хилендарски”.	2011-2012	D5
9	Проект НИ13-ФМИ-002, „Интеграция на ИТ в научните изследвания по математика, информатика и педагогика на обучението“, НПД при ПУ “Паисий Хилендарски”.	2013-2014	D30,D31, D32

## **Справка за научните и научно-приложните приноси, защитавани от автора на дисертацията**

Научните и научно-приложни приноси на дисертационния труд могат да се класифицират в следните категории:

- (А) Доказване с нови средства на съществени нови страни на съществуващи научни проблеми и теории*
- (Б) Създаване на нови класификации, методи на изследване*
- (В) Получаване и доказване на нови факти*
- (Г) Получаване на утвърдителни факти*

- 1) (А, Г) За първи път от 1983 г. насам е предложен нов обобщен аналитичен модел за определяне на температурата на газа в лазери с метални пари и техни съединения (лазер с пари на меден бромид, ултравиолетов лазер с пари на меден бромид и високомощен стронциев атомен лазер с надлъжен наносекунден He-SrBr<sub>2</sub> разряд). За първи път са формулирани нови гранични условия от трети и четвърти род, които по-адекватно описват сложната природа на термичните процеси в газовия разряд, и топлинния поток в системата лазерна тръба - околното пространство. За първи път е предложена обобщена аналитична формула за определяне на средната температура на газа. Развитият обобщен температурен модел [D3, D4] позволява в частност да се получи опростения модел на Кушнер и Уорнър от 1983 г.
- 2) (Б, В) Разработена е нова методика, която позволява при произволно задаване на обемната плътност на електрическата мощност и гранични условия от трети и четвърти род да се определи разпределението на температурата на газа в условията на естествена и принудена конвекция. Полученото разпределение на температурата на газа и в трите вида лазера по-достоверно определя температурата на газа от известните досега аналитични модели.
- 3) (А, Б) За първи път на основата на голям брой статистически техники и методи е развита формална методика, която на базата на натрупаните експериментални данни, позволява да се изследват и анализират процесите в лазерната среда, и да се разработват нови лазерни източници с пари на халогенидите, с предварително зададени изходни параметри, включително лазери с подобрени изходни характеристики (лазерна мощност, лазерна ефективност и време на живот).
- 4) (Б, В) За първи път за разглежданите 3 типа лазери са развити нелинейни параметрични статистически модели от втора и трета степен, които по-достоверно описват сложната нелинейна природа на лазерната генерация.
- 5) (В, Г) За първи път с инструментите на факторния, клъстерен и отчасти регресионния анализ, публикации [D13-D20], е проведен класификационен анализ и е изследвана степента на влияние на 10 независими величини на зависимите физически величини лазерна мощност и ефективност.
- 6) (В, Г) Проведените статистически изследвания с класификационния анализ, публикации [D13-D17], показват, че 5 реални физически величини оказват най-съществено влияние на лазерната мощност и лазерна ефективност. Получените резултати потвърждават експерименталните изследвания относно същественото влияние на подаваната електрическа мощност върху изходната лазерна мощност.
- 7) (Б, В) На базата на получените регресионни модели от първа, втора и трета степен, публикации [D13-D15, D19, D22-D26, D31], е демонстрирано, че те дават широка възможност за конструиране на нови лазерни източници с повишени изходни параметри.
- 8) (А, Б) Развитата формална методика позволява по нов начин да се изследват сложните нелинейни процеси на лазерната генерация. Статистическото изследване на времето на живот на лазерната тръба на УВ лазер позволява за първи път да се анализират процесите и причините, определящи тази изходна величина.

- 9) (B) За UV Cu+ Ne-CuVr лазер, в [D32] е показано, че съществено влияние на лазерната мощност оказва налягането на буферния газ неон.
- 10) (B) В [D29, D30], за UV Cu+ Ne-CuVr лазер, за първи път са разгледани процесите, оказващи влияние на срока на служба на лазерната тръба.

### **Благодарности**

Използвам случая да изкажа своите благодарности към акад. Никола Съботинов и членовете на екипа на Лабораторията по Лазери с пари на металите при ИФТТ „Акад. Георги Наджаков“, БАН, за дългогодишната съвместна научна дейност. Благодарение на тяхната активна подкрепа стана възможно представянето на този труд.