

Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“

Факултет по математика и информатика

Катедра „Математически анализ“

Димитър Васков Фиданов

Математическо моделиране на лазери с метални пàри

Автореферат
на дисертационен труд

за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”
в област на висше образование 4. Природни науки, математика и информатика
Професионално направление 4.5 Математика
Докторска програма: Математическо моделиране и приложение на математиката

Научен ръководител:
Проф. д.м.н. Снежана Георгиева Гочева-Илиева

Пловдив
2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита на разширен катедрен съвет на катедра „Математически анализ” при Факултет по математика и информатика на Пловдивски университет „Паисий Хилендарски”, град Пловдив, проведен на 16.04.2021 г.

Дисертационният труд е с общ обем от 130 страници, от които 24 таблици и 26 фигури. Състои се от увод, четири глави, заключение и библиография от 146 източника. Списъкът на публикациите по дисертационния труд включва 4 заглавия.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 22.06.2021 г. от часа в Заседателната зала на Нова сграда на Пловдивския университет „Паисий Хилендарски” на открито заседание на научно жури в състав:

1. Проф. д-р Михаил Димов Тодоров
2. Проф. д.ф.н. Ренна Бориславова Дюлгерова
3. Доц. д.м.н. Иванка Миткова Желева
4. Доц. д-р Христина Николова Кулина
5. Проф. д.м.н. Снежана Георгиева Гочева-Илиева

Номерацията на формулите, цитиранията, примерите, таблиците и фигурите съвпада с тяхната номерация в дисертационния труд.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в секретариата на ФМИ, нова сграда на ПУ, каб. 330, всеки работен ден от 8:30 до 17:00 часа.

Автор на дисертационния труд: Димитър Васков Фиданов

Заглавие: Математическо моделиране на лазери с метални пари

Съдържание

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	4
Актуалност на моделирането на ЛМП.....	4
Цел и задачи на дисертационния труд.....	4
Използвани данни и методи за моделиране и изследване на ЛМП	5
Структура и обем на дисертационния труд.....	5
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	6
Глава 1. ВЪВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 2. АНАЛИТИЧНИ МОДЕЛИ НА ЛАЗЕРИ С МЕТАЛНИ ПА̀РИ	6
2.1. Опростен аналитичен модел за определяне електронната температура на CuBr лазер.....	6
2.2. Аналитично-числен модел на газовата температура в лазери с медни па̀ри и халогениди на медта	9
2.3. Изследване върху пределните възможности на лазер с па̀ри на меден бромид	10
2.4. Изводи към Глава 2	12
Глава 3. СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НА CuBr-Ne-HBr ЛАЗЕР С ВИСОКОЧЕСТОТНИ ИМПУЛСИ	13
3.1. Обосновка на проблема и постановка на задачата	13
3.2. Използвани данни и обект на изследване	13
3.3. Приложение на ФА и намиране на факторно решение	13
3.4. Полиномен регресионен модел от втора степен на изходната лазерна мощност	15
3.5. Анализ на резултатите от полиномния регресионен модел и интерпретация	16
3.6. Изводи към глава 3.....	17
Глава 4. СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ ЗА CuBr ЛАЗЕРИ, ИЗПОЛЗВАНИ КАТО УСИЛВАТЕЛИ НА ЯРКОСТТА С МЕТОДА НА СЛУЧАЙНИТЕ ГОРИ (Random forest)	17
4.1. Описание на решавания проблем	17
4.2. Корелационен анализ на работните лазерни характеристики	18
4.3. Моделиране на изходната лазерна мощност с регресионни RF модели	18
4.4. Изводи към Глава 4.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	22
Претенции за научни и научно-приложни приноси.....	23
Публикации по темата на дисертационния труд	25
Декларация за оригиналност	26
БИБЛИОГРАФИЯ	27

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на моделирането на ЛМП

Разнообразните приложения на ЛМП и ЛПМБ обясняват, защо този тип лазери продължават активно да се разработват. Стоят открити редица проблеми както в експериментален план, така също и в областта на математическото моделиране. Те са свързани основно с изучаване и разкриване на доминиращите процеси в газовия разряд на нови лазерни устройства и системи, вкл. такива, използвани като усилители на яркостта в модерни оптични системи. Към момента в тази категория спадат лазерите с пары на меден бромид, с малък диаметър на тръбата. Това инициира мотивацията за разработката на този дисертационен труд.

Заедно с развитието на новия тип лазери се натрупват нови данни от експерименти. За статистическата им обработка могат да се използват както възможностите на класическите статистически методи, така и нови интелигентен тип компютърноориентирани техники с машинно обучение. Като цяло задачите са свързани с класификации и регресии. В частност, отворените актуални задачи в моделирането на ЛМП с интелигентни методи се свеждат до определяне на взаимодействията между входни и изходни лазерни характеристики - изходна лазерна мощност, ефективност, време на живот. Целта е постигане на качество на предсказване на моделите, съизмеримо с точността на експеримента. Създадените модели могат да се използват за анализ, подпомагане и насочване на експеримента с цел оптимизиране на работния режим при оценка на съществуващите и конструирането на нови лазерни източници от класа на ЛМП.

Цел и задачи на дисертационния труд

От направения литературен обзор на приложната област и на математическото моделиране следва, че в научно-приложен аспект съществуват редица актуални задачи за по-нататъшното развитие на лазерите с метални пары. От гледна точка на математическото моделиране се концентрираме върху някои конкретни приложни задачи, свързани с електронната и газова температура и статистическата обработка на експериментални данни за ЛМП. Обект на изследванията са реално съществуващи лазери с пары на меден бромид (CuBr лазери), използвани като усилители на яркост и/или като излъчвателни устройства в модерните оптични системи. Конкретните лазерни устройства, които изследваме са създадени от руски учени, в това число учени от Националния Томски Изследователски Държавен университет, Националния Томски Изследователски Политехнически университет и др. За получаване на нови резултати ще се използват основно публикувани резултати и данни. В процеса на работа е осъществено сътрудничество с доц. д-р Станислав Николаевич Торгаев от Националния Томски Изследователски Държавен университет, Русия. От тези констатации можем да заключим, че темата на настоящия дисертационния труд е актуална.

Формулираме следната

Основна цел на дисертационния труд:

Установяване на нови зависимости за някои основни енергетични и термични процеси в лазери с метални пары чрез аналитични и статистически методи на моделиране.

Основните задачи на дисертационния труд:

- 1) Развитие на аналитични модели и аналитично-числено моделиране на електронната температура (енергията на електроните) в разряда на ЛМП;
- 2) Развитие и създаване на нови аналитични модели за определяне на температурния профил на основния инертен газ в ЛМП;
- 3) Установяване на пределните възможности за функциониране на лазера от гледна точка на термойонизационната стабилност на разряда;

- 4) Моделиране на зависимости в експериментални данни за лазери с метални пàри с многомерен статистически анализ;
- 5) Събиране на данни от литературни източници и моделиране на експериментални данни за лазер с пàри на меден бромид с приложение на интелигентни предсказващи техники.

Научни хипотези

Решаването на поставените основни задачи чрез създаване и анализиране както на теоретични, така и на числени и статистически модели, и провеждането на симулации и статистически анализи се очаква да послужат за приложение на модели за:

- Получаване на предварителна оценка и предсказване на нивата на температурата на електроните и получаване на качествено разпределение на газовата температура по радиуса на лазерната тръба за реални лазерни устройства;
- Установяване силата на влияние на независимите работни величини върху изходната лазерна мощност и предсказване на изходната мощност с голяма точност, съизмерима с точността на измерванията (5%).

Използвани данни и методи за моделиране и изследване на ЛМП

Настоящият дисертационен труд е посветен на математическото моделиране на реални данни, избрани от публикувани източници с научни описания на опити и измервания, за лазери с пàри на меден бромид (CBVL) от малки и средни размери. В дисертационния труд за научната обработка на данните са използвани следните основни методи: факторен анализ, многомерна полиномна регресия, методът на случайните гори.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от увод, 4 глави, заключение и библиография с общ обем от 130 печатни страници. Глава 1 съдържа литературен обзор на състоянието на проблема, описание на използваните в дисертацията математически методи и техники и формулиране на целите и задачите на изследванията. Глава 1 съдържа кратко историческо и техническо описание на обекта. В глави 2, 3 и 4 са описани проведените изследвания и анализи, и основните получени научни и научно-приложни резултати. В заключението е представено кратко резюме, списък на публикациите по дисертационния труд и апробации, и са систематизирани претенциите за научните и научно-приложни приноси на дисертационния труд в областта на математическото моделиране на лазери с метални пàри. Библиографията включва 146 източника. Основните резултати са публикувани в 4 научни статии.

Дисертационният труд е разработен във Факултета по математика и информатика на Пловдивския университет “Паисий Хилендарски” в периода 08/2017г. – 08/2020 г.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Глава 1 съдържа кратко историческо и техническо описание на обекта. Изложени са приложенията на лазерите с метални пàри. Разгледана е актуалността на тематиката за моделиране на ЛМП. Представена е сложността на процесите в лазерната среда и нуждата от прилагане на различни теоретични, числени и статистически методи за решаване на голям брой проблеми от тази област. В процеса на моделиране на ЛМП влияние оказват множество величини: **Геометрически дизайн на лазерната тръба**: диаметър, дължина, разположение и брой на външните електроди, дължина на активната зона, диаметър на пръстените в тръбата и др.; **Енергетични**: подавана електрическа мощност, мощност на единица обем, честота на импулса, интензитет на електричното поле, магнитно поле, електронна температура, дизайн и параметри на хранящия блок и др.; **Термодинамични**: температура на лазерната среда (на буферния газ), налягане на буферния газ и налягане на халогенидните добавки, тип на изолация на лазерната тръба и охлаждането; **Оптични**: технология на огледалата, вид на резонатора и др.

Методите на математическото моделиране на ЛМП, могат условно да се разделят на следните категории: **Кинетични**, описващи взаимодействията на частиците – атоми, молекули и йони (възбуждане, йонизация, дисоциация), електронни колизии и др. процеси в разряда посредством уравнения; **Флуидни**, които разглеждат надлъжни процеси по осите на тръбата; **Симулационни**, представянето на частиците е като супер-частици, частица в клетка/Монте Карло колизии, облак в клетка и др.; **Статистически**, с които се предоставя възможност да се откриват класификации и зависимости за конкретен набор от емпирични данни за конкретни лазери. Определени са целта и задачи на дисертационния труд научните хипотези. Описани са използваните основни методи за моделиране и изследване на ЛМП в дисертационния труд: факторен анализ, многомерна полиномна регресия, методът на случайните гори.

Глава 2. АНАЛИТИЧНИ МОДЕЛИ НА ЛАЗЕРИ С МЕТАЛНИ ПÀРИ

2.1. Опростен аналитичен модел за определяне електронната температура на CuBr лазер

2.1.1. Постановка на задачата

Концентрацията на Cu и Ne енергийни нива от йони и електрони се описва чрез система от типа реакция-дифузия, в която се решава следното уравнение за T_e [10, 111]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} N_e T_e \right) = & \frac{E_s^2 \sigma}{e} - 2 N_e (T_e - T_g) \frac{m_e}{m_{Ne}} v_{e-Ne} + Q_r - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_e \frac{\partial}{\partial r} T_e \right) + \\ & + \frac{3}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(-T_e N_e \mu_e E_r + D_e \frac{\partial}{\partial r} (T_e N_e) \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Тук T_e е електронната температура, N_e концентрацията на буферния газ (тук неон), E_s надлъжната сила на електрическото поле, λ_e топлопроводимостта на електроните, D_e коефициентът на електронна дифузия, μ_e коефициентът на електронна подвижност, E_r радиалната сила на електрическото поле, което поддържа квазинеутралността на плазмата, Q_r приносът на реакциите към температурата на електроните, v_{e-Ne} електронно-неоновата еластична скорост на разсейване, m_e масата на електрона, m_{Ne} атомната маса на неона, e заряда на електрона, T_g температура на газа и σ е кондуктивност на плазмата.

2.1.2. Извод на аналитичния модел на електронната температура

За определяне на електронната температура $T_e(r)$ в напречното сечение на разряда се реши следната гранична задача:

$$\begin{aligned} \nabla \lambda_e \nabla T_e &= -\xi q_v, \\ \left. \frac{\partial T_e}{\partial r} \right|_{r=0} &= 0, \quad T_e(R) = T_{e,w}, 0 \leq r \leq R \end{aligned} \quad (2)$$

и ξ е мощност за загряване на електроните, q_v мощността в единица обем, $T_{e,w}$ е известната електронна температура на стената, R е радиусът на ГРТ. Определя се $\lambda_e/\sigma = C_c T_e$, където коефициентът $C_c = \pi^2 (k/e)^2 / 3$, σ е електронната проводимост на газа, k е константата на Болцман, e е електронният заряд. Уравнение (1) приема вида: $\nabla C_c \sigma T_e \nabla T_e = -\xi q_v$

(3)

За да се опростят q_v и σ въвеждаме величини, усреднени по напречното сечение на ГРТ, така че да не зависят от координатите. Така уравнение (3) добива следния вид:

$$\nabla T_e \nabla T_e = -\frac{\xi q_v}{C_c \bar{\sigma}} \quad (4)$$

$$\text{Уравнение (3) е от типа:} \quad \text{div}(\lambda_e \text{grad } T_e) + q_v = 0, \quad (5)$$

където $\lambda_e = \lambda_0 T_e^m$. Тук m и λ_0 са константите, които трябва да се определят.

От $q_v = jE$ и $j = \sigma E$ получаваме $q_v = \sigma E^2$. Тук j е плътността на електрическия поток и E е интензитетът на полето. Разпределението на интензитета на електрическото поле в напречното сечение на тръбата следва закона $E(r) = E_0 J_0(2.4r/R)$, където E_0 е константа и J_0 е

функцията на Бесел от нулев ред от първи род[9]. Така: $q_v(r) = c \left[J_0 \left(\frac{2.4r}{R} \right) \right]^2$

(6)

където c е неизвестна константа, предмет на дефиниране[57] и $q_v(r) = K q_0 (a + b r^2)$ (7)

където K, a и b са търсени константи, q_0 е средната обемна плътност на мощността, когато тя се разпределя равномерно по дължината на напречното сечение на тръбата. МНМК даде следните стойности на неизвестните: $K=1,4383; a=1,0183471; b=-0,001077$. Решението на уравнение от тип (5) при предположение (7) има вида [57]

$$T_e(r) = \left(T_{e,w}^{m+1} - \frac{(m+1) K \frac{\xi q_v}{C_c \bar{\sigma}} (r^2 - R^2) (4a + b r^2 + b R^2)}{16 \lambda_0} \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (8)$$

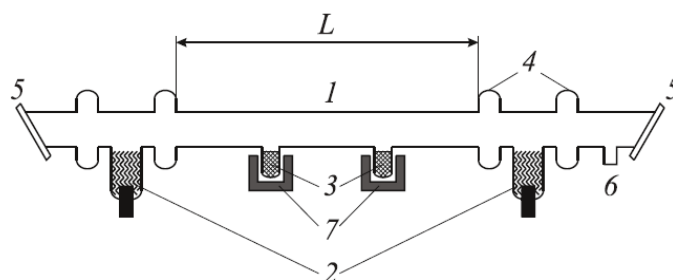
В случая ние приемаме $\lambda_0=1$, $m=1$, $T_{e,w}=0$. Неизвестното в уравнение (8) е ξ . За да го намерим, се използват резултатите от [10, 111] и се реши следният интеграл:

$$\bar{T}_{e,ex} = \frac{1}{R} \int_0^R \sqrt{\frac{2K \frac{\xi q_v}{C_c \bar{\sigma}} (r^2 - R^2) (4a + b r^2 + b R^2)}{16 \lambda_0}} dr. \quad (9)$$

Този интеграл няма точно решение. Стойността му се изчисли числено. Ако в (9) съответните стойности се заменят с тези от [10]: $R=3,5mm$, $\bar{T}_{e,ex}=1,5eV$, $\sigma=4.10^{-5}\Omega^{-1}$, за ξ получаваме $\xi=4,1.10^{-5}$. T_e е усреднена по напречното сечение на тръбата.

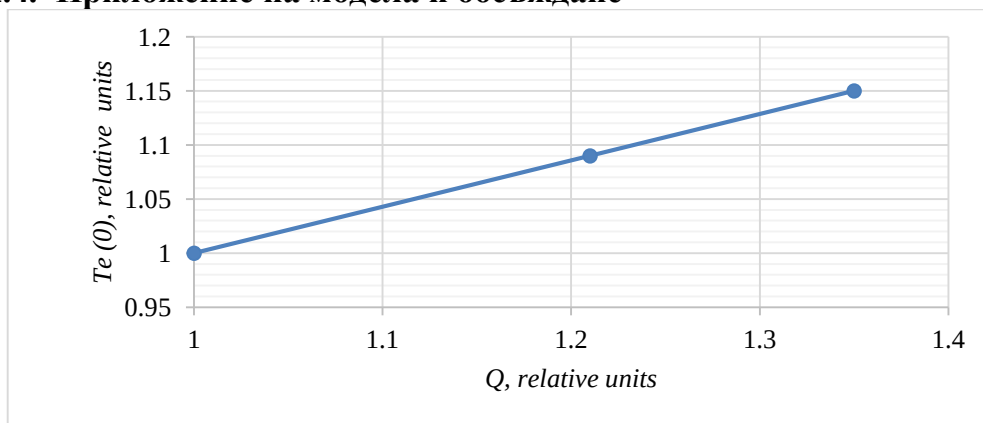
2.1.3. Използвани данни и обект на изследване

Развитият аналитичен модел прилагаме за CuBr лазер, описан в [10].

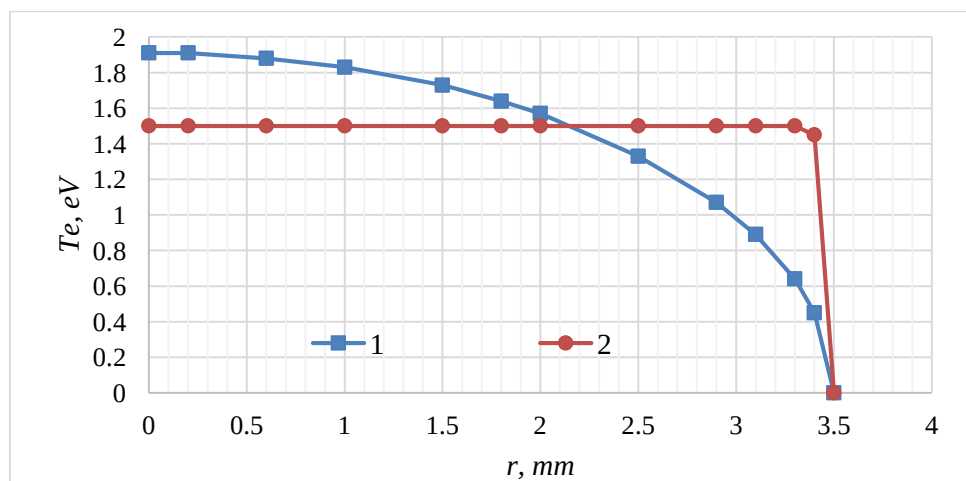


Фиг 2.1. Принципна схема и геометрични характеристики на ГРТ (диаметър ($d=2R$), 0,7 cm) на лазер с пари на меден бромид (CuBr) с буферен газ (неон, 25 Torr), с максимална честота (PRF, 1,1 MHz) [10]: (1) активна зона (L , 14 cm), (2) външни електроди, (3) CuBr контейнери, (4) капани, (5) изходни прозорци, (6) HBr генератор, (7) нагреватели за контейнерите CuBr.

2.1.4. Приложение на модела и обсъждане



Фиг 2.3. Показано е увеличението на енергията на електроните – значително по-бавно от увеличението в захранващата мощност. Когато Q се увеличи с 21%, $T_e(r)$ се увеличава с 9%, а когато Q се увеличи с 35%, $T_e(r)$ – с 15%. Зависимост на промените в температурата на електроните $T_e(0)$ в центъра на тръбата като функция от подаваната електрическа мощност в ГРТ – Q . Зависимостта е дадена в относителни единици, като за основа се вземат значенията $Q=800W$, $T_e=1.91eV$.



Фиг 2.4. Сравнение на изчисленото разпределение (крива 1 ■) на температурата на електроните $T_e(r)$ с радиалното разпределение с резултатите което в [10] е прието за константа (крива 2 ●) за случая на подадена електрическа мощност $Q=800W$.

Прилаганата електрическа мощност в разряда е от основно значение за увеличаване на неговата изходна мощност. Повишаването на електрическата мощност е ограничено от възможно прегряване на плазмата в центъра на тръбата и работата на лазера може да спре. По тази причина е необходимо да се определи радиалното разпределение на температурата на газа T_g в напречното сечение на тръбата като функция на радиуса на тръбата.

2.2. Аналитично-числен модел на газовата температура в лазери с медни пàри и халогениди на медта

2.2.1. Математически модел

За определяне на разпределението на T_g в напречното сечение на ГРТ се реши стационарното уравнение на топлопроводност: $\text{div}(\lambda_g \text{grad} T_g) + q_v = 0$, (10)

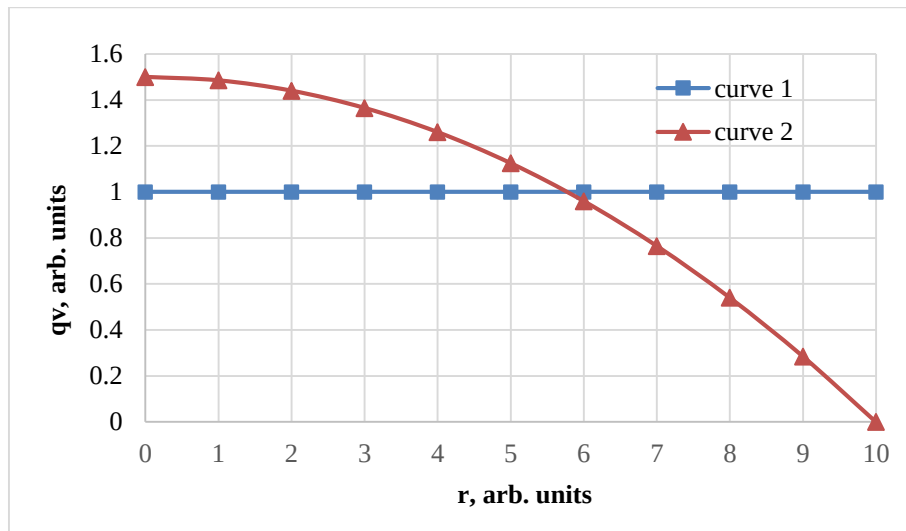
където λ_g е коефициент на топлопроводност на газа, q_v е обемната плътност на мощността на вътрешния източник на топлина, а T_g е температурата в ГРТ. За λ_g апроксимираме $\lambda_g = \lambda_0 T_g^m$.

За уравнение (1) задаваме гранични условия от първи и втори род от вида

$$T_g(R) = T_w, \quad \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad 0 < r < R, \quad (11)$$

където R е радиусът на тръбата. Разглеждаме радиално разпределение на q_v аналогично на 2.1., q_0 е средната обемна плътност на мощността:

$$q_v(r) = K_1 q_0 (a + br^2), \quad K = 1,4383; \quad a = 1,0183471; \quad b = -0,001077 \quad (13)$$



Фиг 2.5. Примерни качествени радиални разпределения на q_v в напречното сечение на лазерната тръба в относителни единици: ■ - крива 1 ($q_v(r) = \text{const}$), ▲ - крива 2 от типа $q_v(r) = K_1 q_0 (a + br^2)$. Двете зависимости са начертани при една и съща подавана електрическа мощност (плещите, определени от всяка една от графиките и оста Ох са равни).

При задаване на q_v от вида (13) разпределението на температурата се изразява с формула [57]:

$$T_g(r) = \left(T_w^{m+1} - \frac{(m+1)K_1 q_0 (r^2 - R^2)(4a + br^2 + bR^2)}{16\lambda_0} \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (14)$$

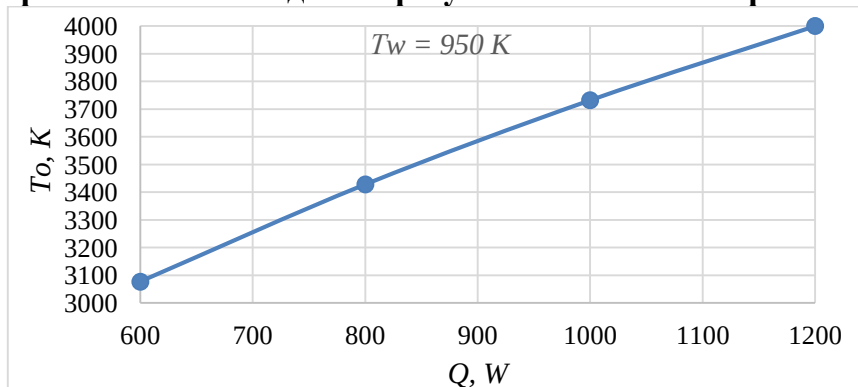
където $q_0 = Q/V$, W/m^3 , Q – захранваща мощност, V е обем на работната среда.

2.2.2. Обект на изследване

Разглежданата експериментална постановка е идентична с тази от 2.1.2, Фиг 2.1.

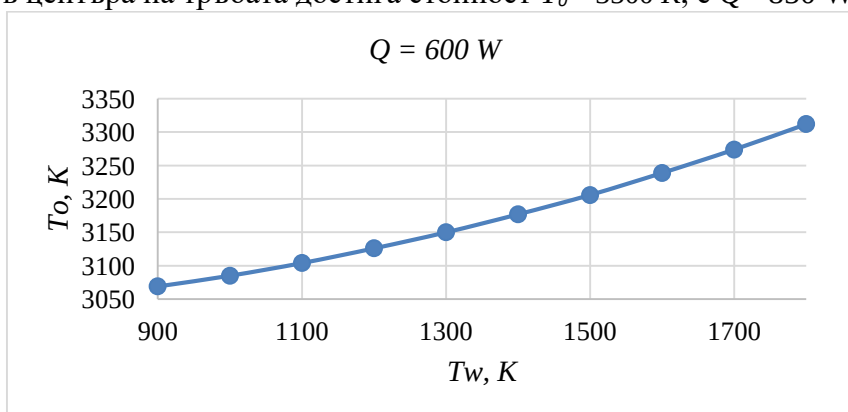
Проведените компютърни симулации имат за цел да установят качествено степента на влияние на Q и температурата на стената T_w върху напречния профил на газовата температура $T_g(r)$ и в частност на температурата на газа в центъра на тръбата T_0 . За коефициента на топлопроводност $\lambda_g = \lambda_0 T_g^m$ на $Cu-Ne-HBr$ приемаме $m=1,54$ и $\lambda_0=1,83 \cdot 10^{-6}$ [73].

2.2.3. Приложение на модела и резултати от компютърните симулации



Фиг 2.7. Изменение температурата на газа T_0 в центъра на тръбата при изменение на подавана електрическа мощност Q в газовия разряд и температура на стената $T_w = 950$ K.

От Фиг 2.7 се вижда, че при тази конфигурация граничната мощност, при която температурата в центъра на тръбата достига стойност $T_0 = 3500$ K, е $Q = 850$ W.



Фиг 2.8. Изменение на температурата в центъра на тръбата T_0 като функция на температурата на стената T_w в интервала (900÷1800 K), при еднаква захранваща газовия разряд електрическа мощност $Q=600$ W.

Подобни резултати са получени за първи път. Те имат важно експлоатационно значение. При едно и също значение на Q при двойно повишаване на температурата на стената температурата в центъра на тръбата се повишава с около 8%. Можем да заключим, че промяната на температурата на стената в широки граници практически не оказва голямо влияние на термичната устойчивост на газовия разряд.

2.3. Изследване върху пределните възможности на лазер с пари на меден бромид

2.3.1. Постановка на задачата и развитие на методологията

2.3.1.1. Постановка на задачата

До този момент няма развита методика, която да позволява да се направи предварителна оценка до какви стойност може да бъде увеличавана енергията на електроните от позициите на термичната устойчивост на газа. Задачата е на база на изведените аналитични модели в 2.1 и 2.2 да се направи оценка на възможните горни граници на основните лазерни работни характеристики – температура на електроните и температура на газа.

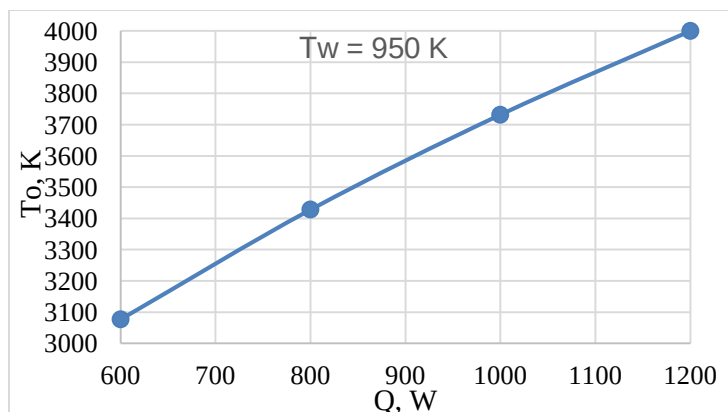
2.3.1.2. Методика за определяне на границите на взаимното нарастване на електронната и газовата температура

С помощта на точните решения (8) и (14) може да се изчислят приблизителните стойности на $T_g(r)$ и $T_e(r)$ при зададени стойности на входната мощност Q . От [62] е известна максимално допустимата температура на газа в ЛМП, $T_g = 3500$ K. Като се използват тези съображения и изведените формули може да се проведе изследване за оценка на границите на нарастване на електронната и газова температура.

2.3.2. Приложение на методиката за оценка на пределните възможности на CuBr лазер

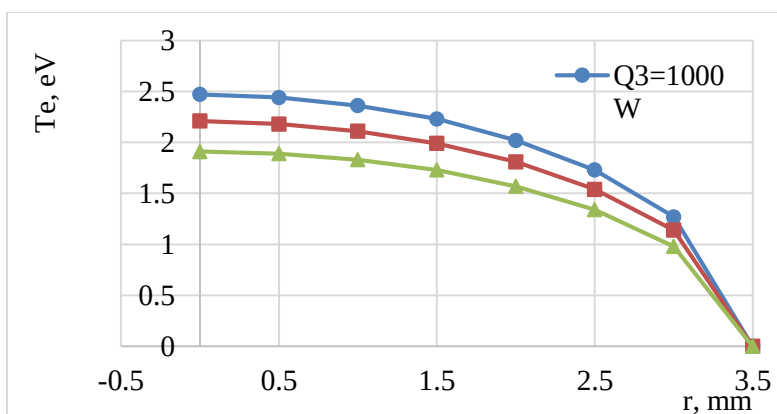
Като пример ще използваме експерименталната постановка от 2.1 (виж Табл. 2.1 и Фиг 2.1). Но методологията може да се приложи и към други лазерни устройства от разглеждания клас лазери.

От Фиг 2.10 се вижда, че максимално допустимата мощност, при която температурата в центъра на тръбата достига $T_0 = 3500$ K, е приблизително $Q = 850$ W.

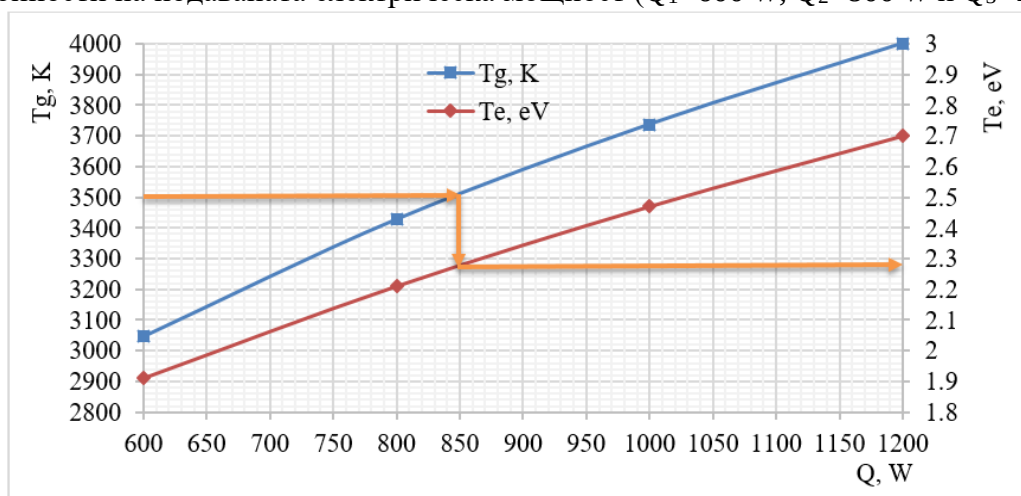


Фиг 2.10. Изменение на температурата на газа T_0 в центъра на тръбата при изменение на подаваната електрическа мощност в газовия разряд. Температурата на стената е $T_w = 950$ K.

За определяне на разпределението на T_e в напречното сечение на тръбата от уравнение (6) е необходимо предварителното определяне на константите C_s , σ , ξ . Ще използваме изчислените им стойности в параграф 2.1. Резултатите на Фиг 2.11 показват изчислените стойности за T_e в центъра на тръбата ($r = 0$) достигат до $\sim 2,25$ eV при $Q = 800$ W и $\sim 2,5$ eV при $Q = 1000$ W.



Фиг 2.11.Разпределение на електронната температура в напречното сечение на тръбата за три стойности на подаваната електрическа мощност ($Q_1=600$ W, $Q_2=800$ W и $Q_3=1000$ W).



Фиг 2.13.Зависимост на температурата на газа и електронната температура в центъра на тръбата като функция на подаваната в газовия разряд електрическа мощност.

За оценка на пределните възможности на лазера нанасяме максималната газова температура в центъра на тръбата $T_g = 3500$ K, както е показано на Фиг 2.13. Тази графика може да се използва като помощна табулограма за примерен CuVg лазер. От нея се вижда, че при $T_g = 3500$ K максимално допустимата подводима електрическа мощност в газовия разряд е $Q = 850$ W. На което съответства максимална стойност на електронната температура в центъра на тръбата $T_e \approx 2,28$ eV. Получените резултати показват, че повишаването на електронната температура чрез повишаване на подаваната електрическа мощност в газовия разряд има своите естествени ограничения и тя не може да бъде повече от 2,28 eV. За нейното по-нататъшно повишаване трябва да се търсят други геометрични и термодинамични методи - промяна на геометрията на тръбата, промяна на формата на тръбата в напречното ѝ сечение, промяна на вида и налягането буферния газ, различни добавки, използване на принудително охлаждане др. Тези промени ще се отразят в коефициентите на решенията (18), (21) и други използвани параметри. Подобно изследване е публикувано за първи път в [P4].

2.4. Изводи към Глава 2

В Глава 2 са развити аналитични модели за семейство ЛМП (медни лазери и лазери с пари на меден бромид), които се използват като усилватели на яркостта в новоразработени оптични системи [28]. Моделите дават възможност да се получат за първи път начални оценки на електронната и газова температура на разряда, които са основни работни лазерни характеристики и да се изчисляват техните пределни стойности за разгледания клас ЛМП. Моделите могат да се прилагат самостоятелно, без необходимост от провеждане на сложни изчисления с модели от стотици уравнения, описани в литературата.

Глава 3. СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НА CuBr-Ne-HBr ЛАЗЕР С ВИСОКОЧЕСТОТНИ ИМПУЛСИ

3.1. Обосновка на проблема и постановка на задачата

Използвайки данни за 7 основни лазерни променливи, тук са поставени следните цели:

- Прилагане на факторен анализ за групиране на всички променливи, за да се открият техните силни взаимовръзки.
- Намиране на адекватно факторно решение.
- Построяване на регресионни модели на изходната мощност с факторите.
- Създаване на параметричен регресионен модел в полиномен вид от втора степен за лазерната изходна мощност в зависимост от 6 независими променливи.
- Да се сравнят прогнозите на модела и реалните експериментални данни.
- Да се демонстрира способността на модела да прогнозира и насочва бъдещи експерименти.

3.2. Използвани данни и обект на изследване

Статистическото изследване на CBVL лазер се извършва въз основа на експериментални данни, публикувани в [10] експериментална постановка е идентична с тази от 2.1. Фиг 2.1.

Табл. 3.1. Изследвани характеристики на CuBr-Ne-HBr лазера.

Независими входящи характеристики	Мярка
f – честота на повторение на импулса PRF	kHz
U – електрическо напрежение	kV
I – средна сила на електрически ток	A
HBr – бромоводород	Torr
C – капацитет на кондензаторите	nF
Pp – въвеждана електрическа мощност	kW
Зависима изходяща характеристика	Мярка
$Plas$ – изходна лазерна мощност (лазерна генерация)	W

Описателната статистика на първоначалните променливи от данните на експеримента, използвани в анализите показва, че разпределението е близко до нормалното.

3.3. Приложение на ФА и намиране на факторно решение

3.3.1. Намиране на факторно решение

Полученото завъртяно факторно решение удовлетворява всички изисквания на процедурата на ФА. Записваме го така:

$$F_1 = \{U, I, Pp, f\}, \quad F_2 = \{HBr\}, \quad F_3 = \{C\} \quad (1)$$

Табл. 3.8. Завъртяно факторно решение с 3 фактора по метода Oblimin.

	Component		
	F1	F2	F3
U	-1,052		
I	0,979		
Pp	0,851		
f	0,784		
HBr		1,004	
C			0,984

- Преценка за правилното групиране на променливите по фактори

Първото условие за разграниченост и групиране на променливите само към един фактор е показано на Таблица 3.8. Друг начин е чрез заместване на получените фактори в началното представяне като произведение на матрици $X = L.F + E$ (виж параграф 1.4.1) и изчисляване на грешките (резидиумите). Това е показано на Табл. 3.9. Вижда се, че всички резидиуми са малки, с изключение само на един, който с малко превишава границата ($0.062 > 0.05$).

Табл. 3.9. Възпроизведени корелации и резидиуми.

		f	C	U	I	Pp	HBr
Reproduced Correlation	f	,952 ^a	-,680	-,865	,939	,927	,429
	C	-,680	,989 ^a	,364	-,494	-,570	-,214
	U	-,865	,364	,933 ^a	-,947	-,885	-,308
	I	,939	-,494	-,947	,989 ^a	,946	,422
	Pp	,927	-,570	-,885	,946	,919 ^a	,451
	HBr	,429	-,214	-,308	,422	,451	,998 ^a
Residual ^b	f		,018	,026	-,012	,003	-,005
	C	,018		,025	-,004	,020	-,005
	U	,026	,025		-,003	,062	-,012
	I	-,012	-,004	-,003		-,005	,001
	Pp	,003	,020	,062	-,005		-,012
	HBr	-,005	-,005	-,012	,001	-,012	

- Изчисляване и запомняне на факторните стойности за по-нататъшни статистически анализи и интерпретация на факторите.

3.3.2. Определяне мястото на зависимата променлива спрямо факторното решение

Табл. 3.11. Завъртяно факторно решение на независимите и зависимата променливи с метода Promax.

Променлива	Factor 1	Factor 2	Factor 3
<i>U</i>	-0.993		
<i>I</i>	0.983		
<i>Pp</i>	0.908		
<i>f</i>	0.859		
<i>HBr</i>		0.916	
<i>Plas</i>		0.910	
<i>C</i>			-0.918

Полученото факторно решение се състои от следните 3 фактора:

$$\phi_1 = \{U, I, Pp, f\}, \quad \phi_2 = \{HBr, Plas\}, \quad \phi_3 = \{C\} \quad (2)$$

Относителният принос на факторите в общата дисперсия на данните е съответно $\phi_1:\phi_2:\phi_3=53\%:24\%:23\%$. Решение (2) не се отличава съществено от (1). Първият фактор $\phi_1=F_1$ обединява променливите (*U*, *I*, *Pp*, *f*) с много големи стойности. Изходната мощност *Plas* е групирана във втория фактор ϕ_2 заедно с *HBr*, тоест *Plas* много силно корелирана с добавката на бромоводород в разряда. Влиянието на *U* и *C* е отрицателно (понижаващо), включително за *Plas*. Ефектът от добавяне на водород, бромоводород и други добавки за значително повишаване на изходната лазерна мощност е добре известен феномен за лазер с пари на меден бромид и други ЛМП [4, 98, 100, 104, 108, 144]. Това се потвърждава много добре от нашия факторен модел (2).

3.3.3. Регресионен модел на изходната лазерна мощност с факторите

Табл. 3.14. Коефициенти на регресия на *Plas* с факторните променливи.

Model	Unst. Coefficients		St.Coeffs	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	3,906	0,263		14,853	0,000		
F1	-1,448	0,326	-0,653	-4,441	0,000	0,685	1,461
F2	1,846	0,295	0,832	6,257	0,000	0,837	1,195
F3	-0,905	0,309	-0,408	-2,934	,0010	0,765	1,307

С помощта на коефициентите записваме регресионното уравнение във вида:

$$\hat{Plas} = 3.906 - 1.448F_1 + 1.846F_2 - 0.905F_3 \quad (3)$$

Стандартизираното уравнение е:

$$z\hat{Plas} = -0.653zF_1 + 0.832zF_2 - 0.408zF_3 \quad (4)$$

Отново най-силно влияние за повишаване на *Plas* има фактор втори, т.е. бромводородът. Първият и третият фактор дават отрицателен ефект. Полученият регресионен модел има коефициент на корелация $R = 0,874$ и обяснява $R^2 = 76,3\%$ от данните.

3.3.4. Анализ на грешките на регресионния модел на изходната лазерна мощност с факторите

Показано е, че грешките са нормално разпределени и не остава зависимост в тях. Установи се, че макар и с малко данни, моделът е сравнително добър и потвърждава известни експериментални резултати за ЛМП.

3.4. Полиномен регресионен модел от втора степен на изходната лазерна мощност

3.4.1. Описание на променливите в полиномен модел от втора степен

Броят на всички променливи е 28.

3.4.2. Построяване на модела от втора степен

Ще търсим регресионно уравнение от втора степен за *Plas* от типа:

$$\hat{Plas} = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i X_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{7-i} b_{ij} X_i X_j \quad (7)$$

където $X_i, i = 1, 2, \dots, 6$ са независимите лазерни характеристики от Табл. 3.2. В регресионното уравнение (7) неизвестните регресионни коефициенти са b_0, b_i, b_{ij} .

Получените статистики на модела са дадени в Табл. 3.15.

Табл. 3.15. Статистики на регресионния модел от втора степен.

Модел	R	R Sq.	Adj. R Sq.	Std. Err of Est.	Sig.
$\hat{Plas}$	0.964	0.929	0.910	0.66573	0.042

Следващата Табл. 3.16 показва оценките за коефициентите на регресия и тяхната статистическа значимост.

Табл. 3.16. Стойности на стандартизираните и нестандартизираните коефициенти на полученото полиномно регресионно уравнение от втора степен.

Параметри на модела	Нестандартизирани коефициенти		Стандартизирани коефициенти	t	Значимост
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-7.514	4.692		-1.601	0.130
<i>U_HBr</i>	4.835	0.351	1.413	13.763	0.000
<i>C_HBr</i>	-10.496	1.283	-0.928	-8.178	0.000
<i>F</i>	-0.085	0.018	-1.105	-4.680	0.000
<i>Pp</i>	9.564	4.291	0.470	2.229	0.042

Може да се заключи, че от всички 27 променливи и константа, само 4 са значими и играят съществена роля в уравнението на регресията (7). Това са *U_HBr*, *C_HBr*, *F*, *Pp*. Използвайки получените оценки, регресионното уравнение (7) на *Plas* се записва във вида

$$\hat{Plas} = -7.541 + 4.835 U_HBr - 10.496 C_HBr - 0.085 f + 9.564 Pp \quad (8)$$

Стандартизираното регресионно уравнение на лазерната изходна мощност се представя от следното уравнение:

$$z\hat{Plas} = 1.413 zU_HBr - 0.928 zC_HBr - 1.105 zf + 0.470 zPp \quad (9)$$

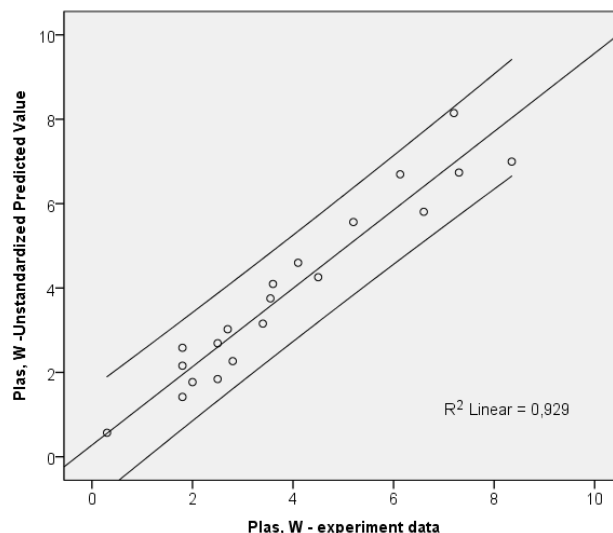
където *zY* означава *z*-стойности на променливата *Y* (виж 1.4.2).

3.4.3. Анализ на грешките от полиномния модел от втора степен

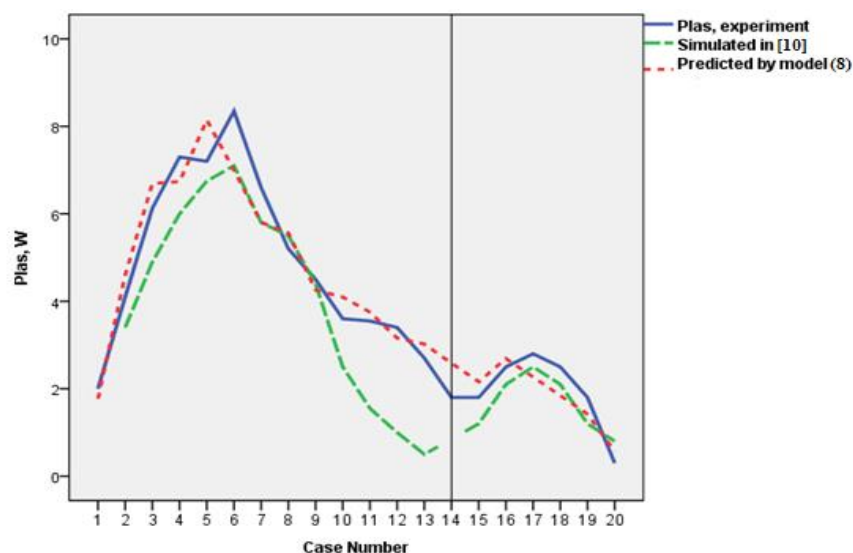
Показва, че можем да заключим, че моделът е статистически валиден.

3.5. Анализ на резултатите от полиномния регресионен модел и интерпретация

При анализиране на статистическата полезност на пригодността на регресионния модел (8) най-важните индекси са коефициентът на множествена корелация *R* и коефициентът на детерминация *R*² [31, 63, 97]. В нашия случай коефициентът на корелация е *R* = 0.964, показващ много висока корелационна зависимост между значимите независими променливи и лазерната генерация *Plas*. Коефициентът на детерминация на модела е *R*² = 0,929, т.е. описва около 93% от наблюдаваните експериментални данни и отговаря на експериментите с висока степен на точност. Общото сравнение за всички наблюдавани измервания спрямо прогнозите на модела е илюстрирано на Фиг 3.6.



ФИГ 3.6. Сравнителна графика на експерименталните стойности на *Plas* с прогнозираните от полиномния регресионен модел от втора степен с 5%-ен доверителен интервал.



ФИГ 3.7. Сравнение на експерименталните данни, предсказаните стойности за *Plas*, изчислени с получения параметричен регресионен модел (8) и стойности от числените симулации, получени в [10].

Като цяло се наблюдава много добро съгласие между експеримента и предсказаните стойности на *Plas*, получени от нашия регресионен модел (8). Сравнението със симулационните стойности, публикувани в [10] показва превъзходство за нашия модел (8). В лявата страна на вертикалната линия са представени случаите с добавяне на 0.6 Torr *HBr* в ГРТ и от дясната страна – случаите без добавката *HBr*.

3.6. Изводи към глава 3

Въз основа на данните от експериментите и многомерния статистически анализ са разработени три вида емпирични модели. Първо, класификацията на основните лазерни характеристики в 3 фактора е получена чрез ФА, който показва, че най-силно влияние върху *Plas* оказва променливата *HBr*. Второ, разработен е линеен регресионен модел с помощта на факторните променливи от ФА. Моделът обяснява данните с коефициент на детерминация 76.3%. Трето, построен и изследван е нелинеен полиномен модел от втора степен, основан на множествен регресионен анализ. Моделът изследва зависимостта на *Plas* от 6 начални и всичките им възможни взаимодействия до втора степен, или напълно от 27 независими променливи и една константа. Постигнато е съвпадение с данните от 93%.

Получените регресионни уравнения са сравнени с експерименталните данни. При направеното сравнение е показано, че регресионният ни полиномен модел превъзхожда резултатите от предсказанията на числената симулация, получени в литературата [10] за същиполиномните данни. Бе потвърдена значимостта на бромдводородните добавки като основна работна характеристика за повишаване на *Plas* от трите построени модела. Определен е относителният принос на отделните променливи върху *Plas*. Такава оценка не може да се получи с кинетични модели.

Глава 4. СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ ЗА CuBr ЛАЗЕРИ, ИЗПОЛЗВАНИ КАТО УСИЛВАТЕЛИ НА ЯРКОСТТА С МЕТОДА НА СЛУЧАЙНИТЕ ГОРИ (Random forest)

4.1. Описание на решавания проблем

4.1.1. Постановка на задачата

- Разкриване на линеен тип корелации между всеки две променливи;

- Установяване на зависимости на лазерната генерация от останалите променливи с помощта на регресия с метода RF.

4.1.2. Използвани данни и начална обработка

Изследването е проведено на база на емпирични данни от исторически тип за десет CuBr лазера. Общият брой описани експерименти е $N=465$. От данните има само 41 липсващи стойности на променливата I. Използвани са следните променливи:

Табл. 4.1. Описание на използваните променливи.

Променлива	Описание	Мерна единица
Pout	изходна лазерна мощност (лазерна генерация) - зависима променлива	W
Prf	честота на повторение на импулса	kHz
Pin	подавана (входна) електрическа мощност	kW
PNe	налягане на буферния газ неон	Torr
PHBr	налягане на добавката бромоводород	Torr
PH2	налягане на добавката водород	Torr
Cp	захранващ капацитет	F (Farad)
Cpp	допълнителен капацитет	F
U	действащо напрежение на електрическия ток	kV
I	действащ електрически ток	mA
GDTbd	диаметър на напречното сечение на газоразрядната тръба	m
L	дължина на активната зона на работната среда	m
Lc	зареждаща индуктивност	H (Henry)

4.2. Корелационен анализ на работните лазерни характеристики

От получената корелационна матрица се заключи, че съществуват високи стойности на корелационна линейна зависимост между част от променливите. Ще отбележим $\rho(Pout, Pin)=0.655$, $\rho(Pout, L)=0.58$, $\rho(Pin, I)=0.95$, $\rho(Prf, Cp)=-0.58$, $\rho(PNe, Cp)=-0.65$, $\rho(GDTbd, L)=0.70$.

4.3. Моделиране на изходната лазерна мощност с регресионни RF модели

4.3.1. Процедури на RF

В секция 4.2. бе изчислен твърде голям корелационен коефициент $\rho(Pin, I)=0.95$.

- Група А: 11 предиктора от Табл. 4.1 без променливата I;
- Група Б: Всички 12 предиктора от Табл. 4.1.

4.3.2. Построяване и изследване на регресионни RF модели на Pout

За моделиране на данните бяха построени множество RF модели. Грешката намалява но е почти равна след $T=200$ дървета. Систематизираната статистика на 12 избрани получени RF модели за Pout показва модел RF_4 с 200 дървета. този модел обяснява повече от 98% от разгледаните случаи в извадката.

Табл. 4.5. Статистики на RF моделите на изходната лазерна мощност Pout за CuBr лазери.

Модел	Брой дървета T	m	Предиктор	R^2 OOB тестова извадка	R^2 предсказани	RMSE OOB	RMSE предсказани
RF_1	100	4	Група А	0.945	0.980	0.989	0.600
RF_2	100	5	Група А	0.947	0.982	0.966	0.576
RF_3	200	4	Група А	0.946	0.981	0.982	0.591
RF_4	200	5	Група А	0.948	0.982	0.955	0.570

RF_5	300	4	Група А	0.946	0.981	0.977	0.586
RF_6	300	5	Група А	0.948	0.982	0.961	0.571
RF_7	100	4	Група Б	0.943	0.980	1.006	0.600
RF_8	100	5	Група Б	0.939	0.980	1.034	0.603
RF_9	200	4	Група Б	0.943	0.981	1.007	0.603
RF_10	200	5	Група Б	0.942	0.981	1.016	0.597
RF_11	300	4	Група Б	0.942	0.980	1.014	0.607
RF_12	300	5	Група Б	0.942	0.981	1.012	0.593

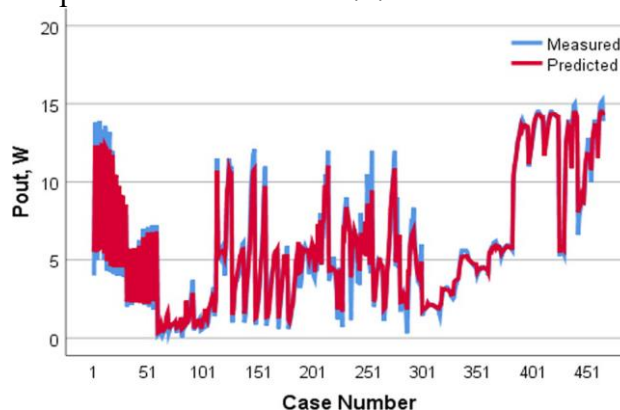
Неговите статистики са най-добри и за тестовата извадка OOB, а именно $RMSE=0.955$ и $R^2=0.948$. При нарастване на броя на дърветата ($T=300$) статистиките на съответните модели започват да се влошават. Можем да заключим, че избраният модел RF_4 с 200 дървета, $m=5$ и 11 предиктора е оптимален. На Табл. 4.6 е се вижда, че P_{out} зависи най-силно от захранващата мощност P_{in} (считана с принос 100%), следвана от променливите PHBr (62.7%), геометричните размери L (20.4%) и GDTbd (17.3%), и т.н. Отново се потвърждава голямото влияние на налягането на добавката на бромоводород (PHBr) в разряда.

Табл. 4.6. Относителен принос на променливите в оптималния модел RF_4.

<i>Променлива</i>	<i>Относителен принос</i>
P_{in}	100.00
PHBr	62.68
L	20.38
GDTbd	17.32
PH2	15.93
C _{pp}	15.74
Prf	13.70
C _p	10.97
PNe	9.84
U	7.25
Lc	2.24

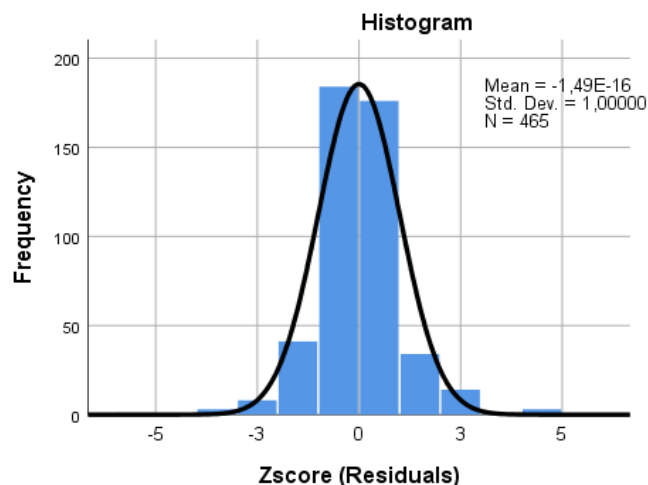
4.3.3. Анализ на оптималния модел RF_4

От Фиг 4.3 се вижда, че е получено много добро съвпадение и предсказваща сила на модела. Може да се заключи, че построеният модел описва много добре зависимостта между P_{out} и основните работни променливи от Табл. 4.1.

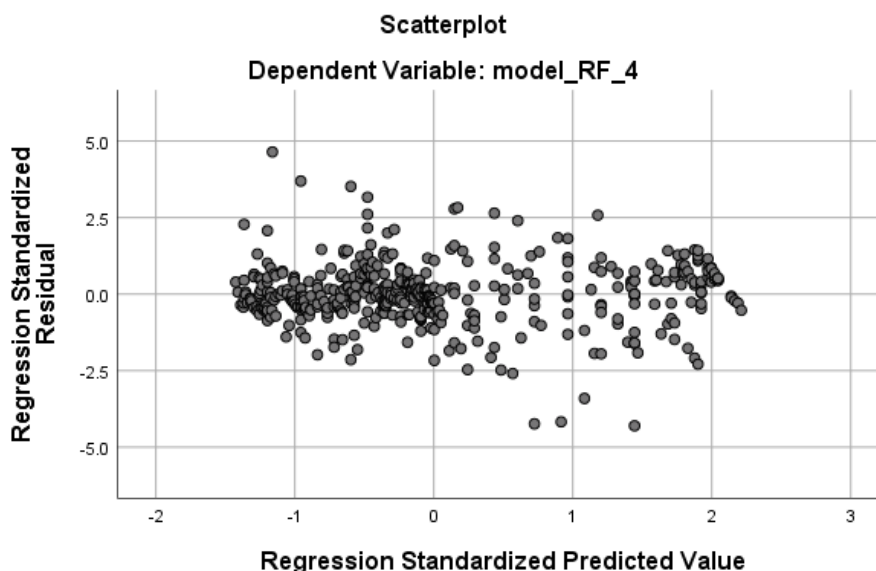


ФИГ 4.3. Сравнение на експериментално измерените стойности на P_{out} срещу предсказаните от регресионния модел RF_4.

Ще направим диагностика на грешките. Фиг 4.4. показва разпределението на стандартизираните остатъци на избрания оптимален модел RF_4, които както се очаква за регресионен тип модел, имат близко до нормалното разпределение. Хетероскедастичността е се вижда на Фиг 4.5. Следва, че в остатъците не остава зависимост.



ФИГ 4.4. Разпределение на стандартизираните остатъци на модел RF_4.



ФИГ 4.5. Хетероскедастичност на грешките на модел RF_4.

Можем да заключим, че построенят RF модел много добре описва зависимостта на лазерната изходна мощност P_{out} на изследваните CuBr лазери от основните работни лазерни величини.

4.3.4. Приложение на модел RF_4 за предсказване на нови експерименти

Регресионните модели имат преимущество да предсказват приближената стойност на зависимата променлива. За целта е необходимо да се зададат значенията на променливите, които допринасят в построяването на модела. За демонстрация на предсказващите възможности на избрания модел RF_4 на база на изследваното множество данни, задаваме следните два демонстрационни експеримента:

Експеримент 1:

$P_{in}=3.5$ kW, $P_{rf}=25$ kHz, $P_{Ne}=20$ Torr, $P_{HBr}=0.2$ Torr, $P_{H_2}=0$ Torr, $C_p=600$ F, $C_{pp}=220$ F, $GDTbd=0.5$ m, $L=1$ m, $U=8$ V, $L_c=0.1$ H.

Моделът RF_4 предказва стойност $P_{out} \approx 12.95$ W.

Експеримент 2:

$P_{in}=4.0$ kW, $P_{rf}=25$ kHz, $P_{Ne}=20$ Torr, $P_{HBr}=0.2$ Torr, $P_{H_2}=0$ Torr, $C_p=610$ F, $C_{pp}=240$ F, $GDTbd=0.6$ m, $L=1$ m, $U=8$ V, $L_c=0.1$ H. Моделът Pout_M5 предказва стойност $P_{out} \approx 12.81$ W.

4.3.5. Обсъждане на резултатите от регресия с метода на Случайните гори

Получените резултати Табл. 4.5 показват, че построените RF модели имат сходни статистически качества. На база показателите за мерките за точност бе избран един RF модел с висока предсказваща способност.

Физическата интерпретация на резултатите от оптималния модел RF_4 е улеснена от установените зависимости между P_{out} и предикторите в модела (Табл. 4.6). Както бе очаквано, най-високо влияние в модела има променливата P_{in} – входящата приложена електрическа мощност. В рамките на 60–63% е относителното влияние добавъчния газ (P_{HBr}), бромоводород, известен факт за CuBr лазерите [28, 98]. Следва да отбележим, че в някои случаи е възможно дадена физична характеристика да не показва явно статистическо оценено влияние върху изходната мощност, ако се е ползвала фиксирана в процеса на експериментите.

Може да се заключи, че резултатите получени от модела RF_4 показват много добри статистически показатели, което се обяснява от силната взаимовръзка между променливите използвани във физическите процеси.

4.4. Изводи към Глава 4

В Глава 4 е проведено статистическо моделиране на емпирични данни от 465 експеримента за ЛМП, подбрани от автора на дисертационния труд от литературни източници. Всеки експеримент е описан с изходната мощност P_{out} и 12 работни характеристики Табл.4.1.

Решени са следните задачи:

- 1) Установяване на бикорелационни зависимости в данните с помощта на непараметричен корелационен анализ;
- 2) Приложение на Random Forest за моделиране на данните с цел предсказване на изходната лазерна мощност P_{out} с възможно по-голяма точност.
- 3) Приложение на RF моделите са определяне в явен вид на степента на влияние на независимите работни характеристики върху изходната лазерна мощност.
- 4) Приложение на RF моделите за оценка и предсказване на лазерната генерация в бъдещи експерименти.

Анализите показаха, че разпределенията на всички променливи са твърде различни от нормалното разпределение. Чрез корелационен анализ със Спирмън ρ коефициенти бе установено, че съществуват високи статистически значими корелационни зависимости между (P_{out}, P_{in}) , (P_{out}, L) , (P_{in}, I) , (P_{rf}, C_p) , (P_{Ne}, C_p) и $(GDTbd, L)$. Всички те имат директна физическа интерпретация и могат да се приемат за надеждни. Тези големи корелационни зависимости са признак за мултиколинеарност между променливите и при ненормалност на разпределенията директното приложение на класически многомерни анализи не е препоръчително. По тази причина за моделирането бе избран методът на Случайните гори (RF), който не се влияе от такива характеристики на данните.

Построени бяха множество RF модели, от които са подбрани няколко с най-добри статистики. Проведен е детайлен анализ на грешките на моделите. Избраният най-добър регресионен RF модел RF_4 на P_{out} описва реалните данни с над 98% (коефициент на детерминация $R^2=0.982$) и корен квадратен на средноквадратичната грешка $RMSE=0.570$. Тези резултати са сравними с получени MARS and CART модели на изходната лазерна мощност за

друг тип CuBr лазери в литературата, където са достигнати коефициенти на детерминация от порядъка на $R^2 = 0.99$. Демонстрирани са примери за приложение на модела RF_4 за предсказване на бъдещи експерименти.

Важен резултат от моделирането с RF са получените относителни тегла на приносите на предикторите в модела. Установено е, че изходната лазерна мощност P_{out} най-силно зависи от входната електрическа мощност P_{in} (100%), от добавъчния газ $PHBr$ (над 60%) и геометричните размери L (20%), $GDTbd$ (17%). Тези резултати имат както потвърдителен, така и практически характер и служат за насочване на нови експерименти.

Развитият RF статистически подход за анализ и извличане на съществени зависимости от експерименталните данни с голяма точност до над 95% може да се прилага както при съществуващите лазерни устройства и системи, така и при конструиране на нови лазери, и в частност, когато е необходима преценка за стойностите на изходната лазерна мощност. Подходът е приложим и за лазерната ефективност, усливането и други изходни характеристики, при наличие на данни от наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главният извод, който можем да направим е, че целта на настоящия дисертационен труд е постигната.

В Глава 1 е направено въведение в проблемната област, в която са проведени изследванията на дисертационния труд – лазерите с пари на металите, използвани като усилители на яркост в новоразработвани активни оптични системи. Направен е литературен обзор на основните публикувани резултати. Заедно с това е представено състоянието на математическото моделиране в това направление и актуалността на тематиката. Определени са целта и задачите на дисертационния труд.

В Глава 2 са развити аналитични модели за определяне на температурата на електроните и газовата температура на ЛМП. На основата на реално съществуващ лазерен източник с пари на меден бромид за първи път е развита методика, която позволява да се определи максимално възможната подавана електрическа мощност в газовия разряд и максималната енергия на електроните от позициите на термийонизационната и електройонизационна устойчивост на разряда. Тази методика позволява да се използва за широк кръг газови лазери и лазери с пари на металите и техните съединения с цел планиране на експеримента за съществуващи лазери и разработване на нови такива, включително за моностатични и бистатични активни лазерни оптични системи.

В Глава 3 въз основа на данните от публикувани експерименти и използването на инструментите на стандартни многомерни статистически методи като Факторен анализ и Множествена линейна регресия са разработени емпирични модели. Първо, класификацията на основните лазерни характеристики в 3 фактора е получена чрез факторен анализ, който показва, че най-силно влияние върху изходната лазерна мощност оказва добавянето на бромоводород в разряда (променливата HBr). Второ, построен и изследван е линейен регресионен модел с помощта на генерираните фактори, описващ данните до 76%. Трето, разработен е нелинеен полиномен модел от втора степен, основан на множествен регресионен анализ. Моделът изследва зависимостта на изходната лазерна мощност от 6 начални и всичките им възможни взаимодействия до втора степен, или от общо 27 независими променливи и една константа. Уравнението на регресията е сравнено с известни резултати от експерименти и е установено високо ниво на надеждност за около 93% от данните. Представен е статистически анализ на модела. Бе потвърдена значимостта на HBr като основна работна лазерна характеристика за определяне на изходната лазерна мощност. Получените моделни стойности са сравнени с известни от литературата числени резултати от симулации за същите данни. Показано е, че регресионният ни модел превъзхожда резултатите от симулациите, получени със сложни числени кинетични модели в [10, 28].

В Глава 4 са представени резултати от статистическо моделиране на данни за нов тип лазери с пàри на меден бромид, използвани в активни оптични системи. Данните от 465 експеримента са специално подбрани и обработени от литературни източници от автора на този дисертационен труд. Описани са 12 независими лазерни работни характеристики и зависима от тях величина - изходната лазерна мощност. Проведени са два типа статистически анализи. Първият от тях използва непараметричен корелационен анализ на Спирмън за изучаване на взаимовръзките между 12-те работни лазерни характеристики и изходната лазерна мощност. Вторият анализ е проведен с мощната и гъвкава дейта майнинг и с машинно обучение регресионна техника Random forest (RF). Построени са RF регресионни модели на основната лазерна характеристика – изходната лазерна мощност. Установена е степента на влияние на независимите величини върху стойностите на изходната мощност. Установено е, че най-голямо влияние оказват входната електрическа мощност, налягането на бромоводорода, следвани от геометричните размери на тръбата. Моделите съвпадат с реалните данни над 98%.

Резултатите от Глава 3 и Глава 4 имат потвърдителен характер на известни факти за ЛМП, но също така и практическо приложение. Предложените и развити подходи дават възможност за явно определяне на влиянието на отделните работни лазерни характеристики върху изходната лазерна мощност, което не може да бъде получено по другите методи на математическо моделиране.

Основните резултати на дисертационния труд са публикувани в 4 научни статии, всички реферирани в научните бази данни на Web of Science (Clarivate) и Scopus, едната статия е в списание с импакт фактор, а другите три - в трудовете на международни конференции.

Може да се заключи, че поставените цел и задачи на дисертационния труд са постигнати.

Претенции за научни и научно-приложни приноси

Получените научни и научно-приложни резултати на дисертационния труд могат да се систематизират както следва:

- 1) За моделиране на температурата на електроните в разряда на лазер а пàри на меден бромид (CuBr) е построен и изследван опростен аналитичен модел, базиран на физични закони и точно решение на уравнението за топлопроводност с гранични условия от първи и втори род. Получено е явно представяне на решението, проведени са компютърни симулации за реален лазер. Подобрени са резултати на други автори, Моделът може да се използва за анализ и бъдещо планиране на експерименти.
- 2) За моделиране на температурата на газа в лазерната тръба е построен и изследван радиален аналитичен модел за ЛМП. Проведени са компютърни симулации за реален лазер с метални пàри.
- 3) На база на моделите за електронната и газова температура за пръв път е предложена и тествана методика за оценка на максималната подавана електрическа мощност в разряда на ЛМП при нормален работен режим.
- 4) Построени и изследвани са модели по реални експериментални данни на изходната лазерна мощност на CuBr-Ne-HBr лазер, използван като високочестотен усилвател на активни оптични системи с помощта на факторен и полиномен многомерен регресионен анализ от втора степен. Получените модели обясняват емпиричните наблюдения с 93 % съвпадение. Установено е влиянието на изследваните работни лазерни характеристики върху лазерната генерация. Моделите имат приложение за оценка и предсказване на експеримента.
- 5) Построени и изследвани са високоефективни регресионни модели на изходната мощност с метода на случайните гори (Random Forest) за голяма извадка експериментални данни за ЛМП от литературни източници. Най-добрият RF модел обяснява измерените стойности на изходната мощност с 98 %. Определено е в явен вид

влиянието на 12 работни лазерни характеристики в общия комплекс променливи величини, което не може да се получи с кинетични или друг тип методи за математическо моделиране. Моделите са приложени за предсказване на експеримента.

Съответствието между основните получени резултати, поставената цел и задачи, приносите и публикациите на дисертационния труд е отразено в долната Таблица.

Таблица. Връзка на основните резултати с целите и публикациите.

Принос	Цел	Задача	Параграф	Публикации
1	1	1	2.1	P[1]
2	1	2	2.2	P[3]
3	1	3	2.3	P[4]
4	1	4	3.1 - 3.5	P[2]
5	1	5	4.1 - 4.3	-

Перспективи за бъдеща работа

Разработените методи и подходи могат да се прилагат на решаване и на други актуални задачи за подобряване на лазерните характеристики и създаване на нови лазерни устройства с пари на металите. Част от тях са поставени от колегите от Томския Национален Изследователски Държавен университет. Бъдещите изследвания могат да бъдат насочени към математическо и статистическо моделиране на лазерните процеси, с разработване и прилагане на нови методи, включително методи за машинно обучение, методи на невронни мрежи и др., както и хибридни методи, за решаване на следните актуални проблеми от голям практически интерес:

- Идентифициране на тенденции за повишаването на честота на лъчението и намаляването на неговата мощност;
- Установяване силата на влиянието на конструктивните елементи на лазера (размери, геометричен дизайн и други фактори), влияещи върху повишаването на честотата на лъчението;
- Получаване на оценки и прогнози за характера и границите на лазерните процеси при моделирани фактори с помощта на статистически модели;
- При наличие на данни, да се моделира и определи ролята и влиянието на входните параметри в усилването и усилената ширина на спонтанната емисионна линия при високи честоти на импулсите.

Апробация

Проекти

Част от резултатите са апробирани в следните университетски проекти:

1. Научен проект МУ-21-ФМИ-015 /2021-2022/ „Високоэффективни предсказващи алгоритми с машинно обучение за моделиране на данни от екологията, индустрията и образованието“ с ръководител доц. д-р Христина Кулина, Фонд „Научни изследвания“ при ПУ „Паисий Хилендарски“;
2. Научен проект МУ19-ФМИ-010 /2019/ „Иновативни ИКТ модели, прогнози и симулации в областта на физиката, екологията, икономиката, здравеопазването и образованието“ с ръководител доц. д-р Христина Кулина, Фонд „Научни изследвания“ при ПУ „Паисий Хилендарски“;
3. Научен проект МУ-17-ФМИ-003/20018/ „Дейта майнинг моделиране и приложни софтуерни системи“ с ръководител проф. д.м.н. Снежана Гочева-Илиева, Фонд „Научни изследвания“ при ПУ „Паисий Хилендарски“, 25.04.2017/30.11.2018 г.;

Доклади

Част от резултатите, получени в дисертационния труд са докладвани на следните национални и международни конференции и семинари:

- [D1] Д. Фиданов, Аналитичен модел за определяне радиалното разпределение на електронната температура на лазер с пàри на меден бромид, Научен семинар по Изчислителна статистика, 22.04.2019 г. Ръководител на семинара: проф. д.м.н. Гочева-Илиева.
- [D2] Д. Фиданов, Статистически модели на характеристики на CuBr-Ne-HBr лазер при високи честоти, Научен семинар по Изчислителна статистика 10.06.2019 г., Ръководител на семинара: проф. д.м.н. Гочева-Илиева.
- [D3] D. Fidanov, 8th International Scientific Conference "TECHSYS 2019" – Engineering Technologies and Systems, Technical University – Sofia, Plovdiv branch, 16-18 May 2019, Plovdiv, Bulgaria.
- [D4] D. Fidanov, 11th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'2019), Albena, Bulgaria, June 20-25, 2019.
- [D5] Д. Фиданов, Аналитични модели за изследване на физични процеси в лазери с метални пàри, Научен семинар по Математическо моделиране и приложения, 12 май 2020 г., Ръководител на семинара: доц. д-р Хр. Кулина.
- [D6] D. Fidanov, 9th International Scientific Conference "TechSys 2020" – Engineering, Technologies and Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 14-16 May 2020.

Публикации по темата на дисертационния труд

- [P1] Gocheva-Ilieva, S., Iliev, I., **Fidanov, D.**, Primary analytical model for determining the electron temperature of a CuBr laser, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 618 (1), Article number 012018, 2019. (8th International Scientific Conference "TECHSYS 2019" – Engineering Technologies and Systems, Technical University – Sofia, Plovdiv branch, 16-18 May 2019, Plovdiv, Bulgaria). DOI: 10.1088/1757-899X/618/1/012018. **Scopus, SJR 0.198.**
- [P2] **Fidanov, D.**, Gocheva-Ilieva, S., Iliev, I., Statistical modeling of CuBr-Ne-HBr laser characteristics at high repetition frequency, AIP Conference Proceedings, vol. 2164(1), Article number 070001, 2019. (11th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'2019, Albena, Bulgaria, June 20-25, 2019). DOI: 10.1063/1.5130821. **Scopus, SJR 0.190.**
- [P3] Iliev, I.P., **Fidanov, D.V.**, Gocheva-Ilieva, S.G., Torgaev, S.N., Computer study of the gas temperature profile in copper and copper vapor halide lasers, Optical and Quantum Electronics, 52:78, pp. 1-7, 2020. DOI: 10.1007/s11082-020-2199-8. **IF 1.842, WOS, Scopus, Q3**
- [P4] Fidanov D.V., Study on threshold capabilities of a copper bromide vapor laser, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 878, Article number 012022, 2020. (9th International Scientific Conference "TechSys 2020" – Engineering, Technologies and Systems, 14-16 May 2020, Plovdiv, Bulgaria), DOI: 10.1088/1757-899X/878/1/012022. **Scopus, SJR 0.198.**

Благодарности

Изказвам своята благодарност и признателност на семейството ми, научния ми ръководител проф. д.м.н. Снежана Гочева-Илиева за нейната постоянна ангажираност към моята работа и за всеотдайната ѝ подкрепа. Изказвам благодарност и на доц. д.ф.н. Илийчо Илиев, доц. д-р Станислав Тораев и гл. ас. д-р Атанас Иванов за плодотворната съвместна работа при подготовката на съвместните публикации.

Благодаря на ръководството на Факултета по математика и информатика, в лицето на проф. д-р Ангел Голев и проф. д-р Боян Златанов, за съдействието и подкрепата в процеса на обучението ми като докторант. Изказвам също благодарности и на членовете на бившата катедра „Приложна математика и моделиране“, както и на доц. д-р Христо Кискинов и всички членове на катедра „Математически анализ“, които по един или друг начин са били съпричастни към работата ми по дисертационния труд, и процедурата по защита.

Декларация за оригиналност

по чл. 27, ал. 2 от ППЗРАСРБ

от Димитър Васков Фиданов
редовен докторант

към катедра „Математически анализ“
на Факултет по математика и информатика
при Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“

Във връзка с провеждането на процедура за придобиване на образователната и научна степен „доктор“ в Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“ и защита на представения от мен дисертационен труд, декларирам:

Резултатите и приносите на проведеното дисертационно изследване, представени в дисертационния ми труд на тема „**Математическо моделиране на лазери с метални пàри**“ са оригинални.

ДЕКЛАРАТОР :.....
/Димитър Фиданов/

25.03.2021
гр. Пловдив

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Abramowitz, M., Stegun, I., Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th ed., New York, Dover Publications, 1964.
- [2] Alves, L.L., Bogaerts, A., Guerra, V., Turner, M.M., Foundations of modelling of nonequilibrium low-temperature plasmas, Plasma Sources Sci. Technol., 27(2), 023002 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaa86d>
- [3] Astadjov, D.N., Dimitrov, K.D., Jones, D.R., Kirkov, V.K., Little, C.E., Sabotinov, N.V., Vuchkov, N.K., Copper bromide laser of 120-W average output power, IEEE J of Quantum Electronics, 33(5) pp. 705–709, 1997.
- [4] Astadjov, D.N., Sabotinov, N.V., Vuchkov, N.K., Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency, Optics Communications, 56, pp. 279–282, 1985.
- [5] Astadjov, D.N., Vuchkov, N.K., Sabotinov, N.V., Parametric study of the CuBr laser with hydrogen additives, IEEE J of Quantum Electronics, 24(9), pp. 1926–1935, 1988.
- [6] Bang-Ning, M., Bai-Liang, P., Li, C., Ya-Juan, W., Zhi-Xin, Y., Kinetic analysis of the factors limiting the output power of the Ne-CuBr UV laser, Chinese Physics B, 18(4), 1542–1546, 2009.
- [7] Batenin, V.M., Buchanov, V.V., Boichenko, A.M., Kazaryan, M.A., Klimovskii, I.I., Molodykh, E.I., “High-brightness Metal Vapour Lasers: Volume I: Physical Fundamentals and Mathematical Models“, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [8] Bergmann, H., Salimbeni, R., Sabotinov, N., Mizeraczyk, J., Wallimann, C., Kostadinov, I., “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, Nov 2002.
- [9] Blau, P., Impedance matching and electric field penetration in metal vapour lasers, In Pulsed Metal Vapour Lasers, NATO Science Partnership (Sub-Series 1 vol. 5) eds C. E. Little and N. V. Sabotinov, Springer, pp. 215–220, 1996.
- [10] Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Nekhoroshev, V.O., Shiyanov, D.V., Torgaev, S.N., CuBr-Ne-HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge, Physics of Wave Phenomena 23(1), 1–13, 2015.
- [11] Boichenko, A.M., Evtushenko G.S., Simulation of a CuBr laser in the presence and in the absence of hydrogen impurity. Laser Physics, 18(4), 403–412, 2008.
- [12] Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Torgaev, S.N., Simulation of a CuBr laser, Laser Physics, Springer, 18 (12), pp. 1522–1525, 2008.
- [13] Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Yakovlenko, S.I., Zhdaneev, O.V., 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.
- [14] Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Zhdaneev, O.V., Yakovlenko, S.I., Preprint No. 5 (Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 2003), p. 1–20, 2003.
- [15] Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Zhdaneev, O.V., Yakovlenko, S.I., Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen additions on the emission parameters of a copper-vapor laser, Quantum Electronics 33(12) pp. 1047–1058, 2003.
- [16] Breiman, L., Bagging predictors. Machine Learning, 24(2), 123–140, 1996. DOI: 10.1007/BF00058655
- [17] Breiman, L., Kutler, A., Random Forest (description and programing codes in Fortran), https://web.archive.org/web/20080622230434/http://stat-www.berkeley.edu/users/breiman/RandomForests/cc_home.htm
- [18] Breiman, L., Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5–32, 2001. DOI: 10.1023/A:1010933404324
- [19] Carman, R.J., Brown, D.J.W., Piper, J.A., A self-consistent model for the discharge kinetics in a high-repetition-rate copper-vapor laser, IEEE Journal of Quantum Electronics, 30(8), 1876–1895, 1994.
- [20] Carman, R.J., Computer modelling of longitudinal excited elemental copper vapour lasers, in: Pulsed Metal Vapor Lasers – Physics and Emerging Applications in Industry, Medicine and Science eds Little C.E., Sabotinov N.V., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 203–214, 1996.
- [21] Chen, C.J., Nerheim, N.M., Russell, G.R., Appl. Physics Letters. Vol. 23, No. 9. P.514–515, 1973.
- [22] Cheng, C., Sun, W., Study on the kinetic mechanisms of copper vapor lasers with hydrogen-neon admixtures. Optics Communications, 144(1-3), 109–117, 1997. DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00328-3
- [23] Chimenti, R., Walter, W.T., Coherence properties of the pulsed copper vapor laser, Bull Am Phys Soc, Vol 16, 41–42, 1971.
- [24] Denev, N., Iliev, I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Second-degree polynomial model of laser generation for a CuBr laser, WSEAS Transactions on Circuits and Systems 12(4) pp129–139, 2013.

- [25] Devis, J., Devis, R., In: Laser Program Annual Report-1976, UCRL-50021-76, Ed. P. E. Coyle, Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 8/3-8, 1977.
- [26] Dimaki, V.A., Sokovikov, V.G., Torgaev, S.N., Trigub, M.V., Troitskii V.O., Shiyarov D.V., Metal vapor lasers, *Atmospheric Oceanic Optics*, 33, 69–79, 2020. <https://doi.org/10.1134/S1024856020010066>
- [27] Evtushenko, G., Torgaev, S., Trigub, M., Shiyarov, D., Bushuev, E., Bolshakov, A., Zemskov, K., Savransky, V., Ralchenko, V., Konov, V., Laser monitor for imaging single crystal diamond growth in H₂-CH₄ microwave plasma, *Optics and Laser Technology*, 120, 105716, 2019.
- [28] Evtushenko, G.S. (ed.), *Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 2018.
- [29] Evtushenko, G.S., Torgaev, S.N., Trigub, M.V., Shiyarov, D.V., Evtushenko, T.G., Kulagin, A.E., High-speed CuBr brightness amplifier beam profile, *Optics Communications*, 383, 148-152, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2016.09.001>
- [30] Evtushenko, G.S., Trigub, M.V., Gubarev, F.A., Evtushenko, T.G., Torgaev, S.N., Shiyarov, D.V., Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting, *Rev. Sci. Instrum.*, 85(3), art. no. 033111, 2014.
- [31] Field, A., “Discovering Statistics Using SPSS“, 3rd ed. (London: Sage Publications) 2009.
- [32] Foster P.G., Industrial applications of copper bromide laser technology, Ph.D. thesis, University of Adelaide, School of Chemistry and Physics, Adelaide, Australia, 2005.
- [33] Fowles, G.R., Silfvast, W.T., High-gain laser transition in lead vapor, *Appl. Phys. Lett.* 6, 236-237, 1965. <https://doi.org/10.1063/1.1754153>
- [34] Geusic, J.E., Skovil, H.E.D., A unidirectional traveling wave optical masers, *Bell System Technical Journal*, Vol.41, No.4, 1371-1397, 1962.
- [35] Ghani, B.A., Hammadi, M., Modeling the plasma kinetics mechanisms of CuBr laser with neonhydrogen additives, *Opt Las Technol*, 38, 67–76, 2006.
- [36] Gocheva-Ilieva, S.G., Iliev, I.P., Modeling and prediction of laser generation in UV copper bromide laser via MARS, in *Advanced research in physics and engineering, series “Mathematics and Computers in Science and Engineering”*, ed. O. Martin et al., Proc. 5th International Conference on Optics, Astrophysics and Astronomy (ICOAA '10), Cambridge, UK, WSEAS Press, 166–171, 2010.
- [37] Gocheva-Ilieva S.G., Iliev, I.P., *Statistical Models of Characteristics of Metal Vapor Lasers*, Nova Science Publ. Inc., New York, 2011.
- [38] Gubarev, F.A., Evtushenko, G.S., Vuchkov, N.K., Sukhanov, V.B., Shiyarov, D.V., Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization, *Rev. Sci. Instrum.*, 83(5), 055111–055115, 2012.
- [39] Gubarev, F.A., Shiyarov, D.V., Sukhanov, V.B., Capacitive-discharge-pumped copper bromide vapor laser with output power up to 15W. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2018-August, 8597961, 1909–1914, 2018. DOI: 10.23919/PIERS.2018.8597961
- [40] Gubarev, F.A., Shiyarov, D.V., Sukhanov, V.B., Evtushenko, G.S., Capacitive-discharge-pumped CuBr laser with 12 W average output power, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 49(1), 89–94, 2013.
- [41] Gubarev, F.A., Sukhanov, V.B., Evtushenko, G.S., Fedorov, V.F., Shiyarov, D.V., CuBr laser excited by a capacitively coupled longitudinal discharge. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 45(2), 171–177, 2009. DOI: 10.1109/JQE.2008.2002502
- [42] Hadi, A.S., Ling, R.F., Some cautionary notes on the use of principal components regression, *The American Statistician*, 52, 5–19, 1998.
- [43] Ho, T.K. Random decision forests, *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, Montreal, QC, 14–16 August 1995, pp. 278–282.
- [44] IBM SPSS Statistics software, <https://www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software>
- [45] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Parametric and nonparametric empirical regression models: case study of copper bromide laser generation, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 697687, 2010.
- [46] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Sabotinov N.V., An improved model of gas temperature in a copper bromide vapour laser, *Quantum Electron*, 39(5), 425–430, 2009.
- [47] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Sabotinov N.V., Analytic study of the temperature profile in a copper bromide laser, *Quantum Electron*, 38(4), 338-342, 2008.
- [48] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V., Analytical model of temperature profile in a He-SrBr₂ laser, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 11(7), 1025–1032, 2009.
- [49] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V., An improved radial temperature model of a high-powered He-SrBr₂ laser, *Optics and Laser Technology*, Elsevier, 43(3), 642-647, 2011. DOI:10.1016/j.optlastec.2010.09.005

- [50] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Astadjov, D.N., Denev, N.P., Sabotinov, N.V., Statistical analysis of the CuBr laser efficiency improvement, *Optics and Laser Technology*, vol. 40, issue 4, pp. 641-646, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.009>
- [51] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Modeling and simulation of output power of a high-power He–SrBr₂ laser by using multivariate adaptive regression splines, *Optics & Laser Technology*, 45(1), 461-468, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.009>
- [52] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Study of UV Cu + Ne – CuBr laser lifetime by statistical methods, *Quantum Electronics*, 43 (11), 1014–1018, 2013. DOI:10.1070/QE2013v043n11ABEH015125. <http://www.mathnet.ru/links/ef6011620ee79df012a59188eafbb4b9/qe15125.pdf>
- [53] Iliev I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Temelkov, K.A., Vuchkov, N.K., Sabotinov, N.V., Modeling of the radial heat flow and cooling processes in a deep ultraviolet Cu+ Ne–CuBr laser, *Mathematical Problems in Engineering, Theory, Methods and Applications*, Vol. 2009, Article ID 582732, 2009. <http://dx.doi.org/10.1155/2009/582732>
- [54] Iliev, I.P. Gocheva-Ilieva, S.G., Optimization of the temperature profile of a high-powered strontium bromide laser, *Electrical Engineering*, 100(3), 1537–1544, 2018. DOI: 10.1007/s00202-017-0631-2.
- [55] Iliev, I.P. Gocheva-Ilieva, S.G., Self-consistent analytical model of the radial temperature profile of a high-powered He–SrBr₂ laser, *Optical and Quantum Electronics*, 48: 397, 1-12, 2016. DOI: 10.1007/s11082-016-0665-0
- [56] Iliev, I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Astadjov, D.N., Denev, N.P., Sabotinov, N.V., Statistical approach in planning experiments with a copper bromide vapor laser, *Quantum Electron*, 38(5), 436–440, 2008.
- [57] Iliev, I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Model of the radial gas temperature distribution in a copper bromide vapour laser, *Quantum Electronics*, 40(6), 479–483, 2010. doi: 10.1070/QE2010v040n06ABEH0142012010
- [58] Iliev, I.P., Gocheva-Ilieva, S.G., Study on the maximum electric power supplied to copper bromide vapor lasers. *Journal of Computational Electronics*, 19, pp. 1187–1191, 2020. DOI: 10.1007/s10825-020-01490-w
- [59] Iliev, I.P., Voynikova, D.S., Gocheva-Ilieva, S.G., Application of the classification and regression trees for modeling the laser output power of a copper bromide vapor laser. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID: 654845, 2013. DOI:10.1155/2013/654845, ISSN 1024-123X
- [60] Iliev, I.P., Voynikova, D.S., Gocheva-Ilieva, S.G., Simulation of the output power of copper bromide lasers by the MARS method. *Quantum Electronics*, 42(4), 298–303, 2012. DOI:10.1070/QE2012v042n04ABEH014808
- [61] Ilieva, M., Stoyanova, A., Tsakova, V., Vuchkov, N.K., Temelkov, K.A., Erfurth, W., Sabotinov, N.V., Effect of deep UV laser treatment on electroless silver precipitation in supported poly-3,4-ethylenedioxythiophene layers, *Optoelectron Adv Materials*, 11(10) 1444-1447, 2009.
- [62] Isaev, A.A., Kazarian, M.A., Petrash, G.G., Possibility of generation of high average laser powers in the visible part of the spectrum, *Kvantovaya Elektronika Moscow*, Vol.1, pp.112-115, 1973.
- [63] Izenman, A.J., *Modern Multivariate Statistical Techniques Regression, Classification, and Manifold Learning*, Springer, New York, NY, USA, 2008.
- [64] Janke, E., Emde, F., Lösch, F., *Special Functions*, Moscow, Nauka, 1977. (Янке Е, Эмде Ф, Леш Ф, Специальные функции, Москва, Наука), 1977.
- [65] Jolliffe, I.T. A note on the use of principal components in regression, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 31 (3), 300–303, 1982.
- [66] Klimovskij, I.I., Selezneva, L.A., Effect of the non uniformity of the discharge in the gas temperature in copper vapor lasers operating under periodical pulse conditions, *Teplofizika vysokih temperatur*, 23, 667-672, 1985. (in Russian)
- [67] Kulagin, A.E., Torgaev, S.N., Evtushenko, G.S. Kinetic modelling of amplifying characteristics of copper vapor active media for a wide range of input radiation power, *Optics Communications*, 125136. Volume 460, 125136, 2019.
- [68] Kulagin, A.E., Torgaev, S.N., Evtushenko, G.S., Trigub, M.V., Kinetics of the active medium of a copper vapor brightness amplifier, *Russian Physics Journal*, 60(11), 1987-1992, 2018.
- [69] Kulagin, A.E., Torgaev, S.N., Evtushenko, T.G., Mathematical model for copper bromide laser. In: *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2014 15th International Conference of Young Specialists on, June 30 2014 - July 4 2014, Novosibirsk, Russia, pp. 305-308. IEEE, 2014. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882535;
- [70] Kushner M.J., Warner B.E., Large bore copper vapor lasers: Kinetics and scaling issues, *J Appl Phys*, 54 (6), 2970-2982, 1983.
- [71] Kushner, M.J., A self-consistent model for high repetition rate copper vapor lasers, *J Quant Electron QE-17*, 1555-1565, 1981.
- [72] Lanczi, E.R., Amplification in a thick ruby lens, *Applied Optics*, Vol. 4, No. 2, 255, 1965.
- [73] Le Guyadec, E., Countance, P., Bertrand, G., Peltier C., A 280-W average power Cu-Ne-HBr laser amplifier, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 35(11), 1616–1622, 1999.

- [74] Lee, S., Lee, T., Kim H, Kim, J., Eun, H., Kim, R., A practical comparison of Copper Bromide Laser for the treatment of vascular lesions, Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 6610363, pp. 3765-3768, 2013. doi: 10.1109/EMBC.2013.6610363. 2013
- [75] Leonard, D., A theoretical description of the 5106-Å pulsed copper vapor laser. IEEE Journal of Quantum Electronics, 3(9), 380–381, 1967. doi:10.1109/jqe.1967.1074614
- [76] Li, L., Mostovshchikov, A.V., Ilyin, A.P., Antipov, P.A., Shiyanov, D.V., Gubarev, F.A., Imaging system with brightness amplification for a metal-nanopowder-combustion study, Journal of Applied Physics 127(19), 194503, 2020. <https://doi.org/10.1063/1.5139508>
- [77] Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J., Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, New York, John Wiley & Sons, 2005.
- [78] Lima, S.M., Behrouzinia, S., Khorasani, K., Amplifying characteristics of small-bore copper bromide lasers, Applied Physics B: Lasers and Optics, 125(6), 101, 2019.
- [79] Lima, S.M., Various buffer gas effects on amplifying parameters of a copper bromide laser, Laser Physics, 30(3), 035003, 2020.
- [80] Lister, G.G., Low-pressure gas discharges modeling, J Phys D: Appl Phys 25, 1649-1680, 1992.
- [81] Little, C. E., Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications, Chichester, John Wiley & Sons, 1999.
- [82] Little, C.E., Metal vapour ion lasers: Kinetic processes and gas discharges, John Wiley & Sons, 1996.
- [83] Mao, B.N., Pan, B.L., Chen, L., Wang, Y.J., Yao, Z.X. Kinetic analysis of the factors limiting the output power of the Ne–CuBr UV laser. Chinese Phys B 18, 1542-1546, 2009. DOI: 10.1088/1674-1056/18/4/041
- [84] McCoy, S., Hanna, M., Anderson, P., McLennan, G., Repacholi, M., An evaluation of the copper–bromide laser for treating telangiectasia, Dermatol Surg. 22(6), 551–557, 1996.
- [85] McHugh, C., “WELCOME TO THE MACHINE: Marc Brickman, Robbie Williams, and Mark Fisher Set The Stage For Pink Floyd's World Tour”, Lighting Dimensions (212-229-2981), September 1994 issue.
- [86] Mouchovski, J.T., Temelkov, K.A. Vuchkov, N.K., Sabotinov, N.V., Calcium strontium fluoride crystals with different composition for UV-laser application: control of growing rate and optical properties, Comp. Rend. l'Acad. Bulgare des Sciences, 62(6), 687-694, 2009.
- [87] Myers, R.A., Wieder, H., Pole, R.V., Wide field active imaging, IEEE J. Quant. Electr., Vol.2, No.8, 270-275, 1966.
- [88] Namnabat, M., Behrouzinia, S., Moradi, A.R., Khorasani, K., Determination of plasma temperature of copper vapour laser, Journal of Plasma Physics, 82(1), 905820105, 2016.
- [89] Nekhoroshev, V.O., Fedorov, V.F., Evtushenko, G.S., Torgaev, S.N., Copper bromide vapour laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz, Quantum Electronics, 42(10), 877–879, 2012.
- [90] Oakley, A., Copper bromide laser, DipHealInf, Department of Dermatology, Waikato Hospital, Hamilton, New Zealand, 2001. <https://dermnetnz.org/topics/copper-bromide-laser/>
- [91] Pan B.L., Chen G., Mao B.N., Yao Z.X., Kinetic process of UV Cu⁺ laser in Ne-CuBr longitudinal pulsed discharge, Optics Express, 14, 8644-8653, 2006.
- [92] Petrash, G.G., On the simulation of a copper vapour laser with hydrogen admixtures, Quantum Electron, 35(6), 576-577, 2005.
- [93] Rabinowitz, P., Chimenti, R., Short communication, Journal of the Optical Society of America, Vol.60, No.3, 1577-1582, 1970.
- [94] Rabinowitz, P., Chimenti, R., Super-radiant illuminator projector,. Program of the 1970 Annual Meeting of the Optical Society of America. Journal of the Optical Society of America, 60(11), 1577-1578, 1970. doi:10.1364/josa.60.001540
- [95] Rabinowitz, P., Jacobs, S., Gould, G., Continuous optically pumped Cs laser, Appl. Optics, 1(4), 513-516, 1962.
- [96] Raizer, Y.P., Schneider, M.N., Yatsenko, N.A., Radio-Frequency Capacitive Discharges, New York, CRC, 1995. (Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко, Высокочастотный емкостный разряд, Москва, МФТИ, 1995).
- [97] Rencher, A.C., Methods of Multivariate Analysis, 2nd ed., New York, Wiley, 2002.
- [98] Sabotinov, N.V., “Metal Vapor Lasers,” in Gas Lasers, edited by M. Endo and R. F. Walter, CRC Press, Boca Raton, pp. 449–494. 2006.
- [99] Sabotinov, N.V., Telbizov, P.K., Kalchev, S.D., Bulg. Inv. Cert. Appl. No. 29874, “Copper vapor gas laser“, 1975.
- [100] Sabotinov, N.V., Vuchkov, N.K., Astadjov, D.N., Effect of hydrogen in the CuBr and CuCl-vapour lasers, Opt. Commun., 95(1-3), 55-56, 1993.
- [101] Sabotinov, N.V., Vuchkov, N.K., Astadjov, D.N., Gas laser discharge tube with copper halide vapors, United

States Patent 4635271, 1987.

- [102] Salford Predictive Modeler, <https://www.minitab.com/en-us/products/spm/>
- [103] Shawlow, A.L., Townes, S.H., Infrared and optical masers, *Physical Review*, Vol.112, No.7, 1940-1958, 1958.
- [104] Shiyonov, D.V., Evtuchenko, G.S., Sukhanov, V.B., Fedorov, V.F., Effect of gas mixture composition and pump conditions on the parameters of the CuBr-Ne-H₂(HBr) laser, *Quantum Electronics*, 37, 49-52, 2007.
- [105] Shiyonov, D.V., Sukhanov, V.B., Gubarev, F.A., Influence of peaking capacitance on the output power of capacitive-discharge-pumped metal halide vapor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 54(2), 1500107, 2018. DOI: 10.1109/JQE.2018.2806943
- [106] Steen, W.M., Mazumder, J., *Laser Material Processing*, London, Springer-Verlag, 2010.
- [107] Tanzi, E.L., Lupton, J.R., Alster, T.S., Lasers in dermatology: Four decades of progress, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 49(1), 1-34, 2003. doi: 10.1067/mjd.2003.582
- [108] Tiwari, G.N., Shukla, P.K., Mishra, R.K., Shrivastava, V.K., Khare, R., Nakhe, S.V., Effect of addition of hydrogen to neon buffer gas of copper bromide vapor laser on its spectral and temporal characteristics, *Opt Commun*, 338, 322-327, 2015.
- [109] Toraldo de Prancia, G., Super-gain antennas and optical resolving power, *Suppl. II Nuovo Cimento*, Vol.9, No.3, 426-438, 1952.
- [110] Torgaev, S.N., Boichenko, A.M., Evtushenko, G.S., Shiyonov, D.V., Simulation of a CuBr-Ne-HBr laser with high pump pulse repetition frequencies. *Russian Physics Journal*, 55(9), 1039–1045, 2013. DOI: 10.1007/s11182-013-9919-5
- [111] Torgaev, S.N., Kulagin, A.E., Evtushenko, T.G., Evtushenko, G.S., Kinetic modeling of spatio-temporal evolution of the gain in copper vapor active media, *Optics Communications*, 440, 146–149, 2019.
- [112] Trigub, M.V., Torgaev, S.N., Evtushenko, G.S., Drobchik, V.V., Laser monitors for high speed imaging of plasma, beam and discharge processes. *Key Engineering Materials*, 712, 303–307, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.303
- [113] Trigub, M.V., Torgaev, S.N., Evtushenko, G.S., Troitskii, V.O., Shiyonov, D.V., “A bistatic laser monitor“, *Technical Physics Letters*, 42(6), pp.632-634, 2016b.
- [114] Trigub, M.V., Evtushenko, G.S., Torgaev, S.N., Shiyonov, D.V., Evtushenko, T.G., “Copper bromide vapor brightness amplifiers with 100 kHz pulse repetition frequency,” *Optics Communications*, 376, 81–85, 2016.
- [115] Trigub, M.V., Zuev, V.E., Evtushenko, G.S., Gubarev, F.A., Torgaev, S. N., High-speed process visualization using CuBr-laser, micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), in *Proc.2012 IEEE 13th Intern. Conf. Seminar of Young Specialists*, .260-263, 2012.
- [116] Vuchkov, N., High discharge tube resource of the UV Cu⁺ Ne-CuBr laser and some applications. In: *New Development in Lasers and Electric-Optics Research*, ed. Arkin W. T., New York, Nova Science Publishers, pp. 41-74, 2007.
- [117] Vuchkov, N., Sabotinov, N., Temelkov, K., “Ultraviolet Copper laser,” Patent Reg. no. 103312, 06.04.1999, Published Applications for Inventions, BG 10/2000.
- [118] Vuchkov, N., Temelkov, K., Sabotinov, N., Laser tube for strontium infrared laser with strontium halide vapours, BG patent No. 66247, 2012.
- [119] Vuchkov, N.K., Temelkov, K.A., Sabotinov, N.V., UV Lasing on Cu⁺ in a Ne-CuBr pulsed longitudinal discharge, *IEEE J Quantum Electron*, 35, 1799-1804, 1999.
- [120] Vuchkov, N.K., Temelkov, K.A., Zahariev, P.V., Sabotinov, N.V., Output parameters and a spectral study of UV Cu⁺ Ne-CuBr laser, *Opt Laser Technol*, 36(1), 19-25, 2004.
- [121] Walter, W.T., Piltch, M., Solimene, N., Gould, G., Bennett Jr, W.R., Pulsed laser action in atomic copper vapor, *Bull. Amer. Phys. Soc.* Vol. 11, No.1 , 113, 1966.
- [122] Walter, W.T., Solimene, N., Piltch, M., Gould, G., “6C3-efficient pulsed gas discharge lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-2, No. 9. pp. 474-479, Sept. 1966.
- [123] Warner, B., Atomic vapour laser isotope separation, *Proc. SPIE* 737, 2–6, 1998.
- [124] Webb, C., Jones, J. eds., *Handbook of laser technology and applications*, vol. 2., New York: Institute of Physics Publishing, 2004.
- [125] Webb, C., Jones, J.D.C., *Handbook of Laser Technology and Applications*, Vol. 3: Applications, Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing, Taylor & Francis, 2003.
- [126] Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/?source=nav>
- [127] Yang, W., Zhou, Q., Yang, W., Dong, Y., Dong, Z., The accuracy of collision cross sections in particle modeling on copper vacuum arcs, *Physics of Plasmas* 25, 063521 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5032276>
- [128] Yu D.L., Wang R.W., Tao Y.X., Physical simulation for large-bore copper vapor laser, *Chin. Phys. Lett.*, 17, (1), 19-21, 2000.
- [129] Zemskov, K.I., Petrash G.G., Chvykov V.V., Optical systems with metal vapour brightness amplifiers, In:

Pulsed metal vapor lasers: proceeding of the NATO advanced research workshop on pulsed metal vapor lasers – physics and emerging applications in industry, medicine and science, St Andrews, U.K., Aug 6-10 1995, Little C.E. and Sabotinov (eds.), Kluwer Academic Publishers, 453-458, 1996.

- [130] Zureng, X., Guiyan, Z., Fucheng, L., “Applications of the CuBr vapor laser as an image-brightness amplifier in high-speed photography and photomicrography“, Applied Optics, Vol. 31, pp.3395-3397, 1992.
- [131] Басов, Н.Г., Грасюк, А.З., Зубарев, И.Г., Тевелев, Л.В., Регенеративные оптические квантовые усилители, Труды ФИАН, Т.31, 74-95, 1965.
- [132] Бойченко, А.М., 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.
- [133] Гочева-Илиева, С.Г., Илиев, И.П., Параметрични модели на характеристиките на лазер с пари на меден бромид“, Пловдив, Университетско издателство „Паисий Хилендарски“, 2010.
- [134] Евтушенко, Г.С., Казарян, М.А., Торгаев, С.Н., Тригуб, М.В., Шиянов, Д.В., Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов, Томск: STT, 2016.
- [135] Евтушенко, Г.С., Шиянов, Д.В., Губарев, Ф.А., Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов, 2-е изд.-Томск, ТПУ, 2012, 276с.
- [136] Земсков, К.И., Исаев, А.А., Казарян, М.А., Петраш, Г.Г. Исследование основных характеристик лазерного проекционного микроскопа, Квантовая электроника, 3, № 1, с 35-43, 1976.
- [137] Земсков, К.И., Исаев, А.А., Казарян, М.А., Петраш, Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп, Квантовая электроника, № 1, 14–15, 1974.
- [138] Исаев, А.А., Казарян, М.А., Петраш, Г.Г., Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации, Письма в ЖЭТФ. Т. 16, Вып. 1, 40–42, 1972.
- [139] Казарян, М.А., Оптические системы с усилителями яркости и изображений: дис. докт. физ.-мат. наук, Москва, 1987, с. 391.
- [140] Кулагин, А.Е., Торгаев, С.Н., Евтушенко, Г.С., Радиальная модель температуры газа в активных средах на парах металлов. Оптика атмосферы и океана. Т. 31. № 12. С. 1007–1009, 2018. DOI: 10.15372/AOO20181211
- [141] Кулагин, А.Е., Торгаев, С.Н., Пространственно-временная кинетическая модель активной среды лазера на парах меди, Труды XXVI Международной Конференции Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте–2018, г. Новороссийск, Краснодарский край, 10 - 15 сентября 2018 г., pp. 51-52, 2018. <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000722244/SOURCE1>
- [142] Пасманик, Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др., Оптические системы с усилителями яркости, Горький, ИПН АФ СССР, 1988, с. 173.
- [143] Петраш Г. Г., “Лазеры на парах металлов”, Справочник по лазерам, пер. с англ. с изм и доп., под ред. А.М. Прохоров, Москва, т. 1, с. 183-197, 1978.
- [144] Петраш Г.Г., Импульсные лазеры на парах металлов и их соединений: проблемы и перспективы, Изв. вузов. Физика. Т.42, №8. С18-22, 1999.
- [145] Петраш, Г.Г., Оптические системы с усилителями яркости, Москва, Наука, Труды ФИАН, Т. 206, 152 с. 1991.
- [146] Торгаев С.Н., Кулагин А.Е., Математическая модель CuBr-лазера, журнал Вестник науки Сибири, (Siberian Journal of Science), Серия Инженерные науки, Выпуск № 4 (14) 26-31, 2014.