



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ФИЗИКА НА ТВЪРДОТ О ТЯЛО
“Академик Георги Наджаков”



ЛАБОРАТОРИЯ “ЛАЗЕРИ С МЕТАЛНИ ПАРИ”

Нина Кънчева Колева

2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен He-SrBr₂ разряд за мощен стронциев лазер

Автореферат

на дисертация за получаване на образователната и научна степен “доктор”

Професионално направление: 4.1. Физически науки

Научна специалност: Физика на вълновите процеси

Научни ръководители: **проф. дфн Н. К. Вучков**

доц. д-р К. А. Темелков

Научен консултант: **доц. д-р Т. П. Черногорова**

СОФИЯ

2014

Дисертацията се състои от 118 страници, 22 фигури, 4 таблици и 145 цитирани литературни източника. Брой на публикациите на докторанта, свързани с дисертационния труд - 4

Нина Кънчева Колева е редовен докторант към Лаборатория “Лазери с метални пари”, ИФТТ, БАН.

Дисертационния труд е обсъден и насочен за защита от научен семинар на направление “Лазерна физика, физика на атомите, молекулите и плазмата”, Институт на Физика на Твърдото Тяло “Академик Георги Наджаков” – БАН , състоял се на 02.10. 2014г.

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

ISSP-BAS-2014-PhD 015

Защитата на дисертационния труд ще се състои на отчаса в зала..... на Институт по Физика на Твърдото Тяло “Акад. Г. Наджаков” – БАН, бул. “Цариградско шосе” 72, София, пред научно жури в състав:

1. Доц. д-р Димо Николов Астаджов
2. Проф. дфн Николай Кирилов Вучков
3. Проф. д-р Снежана Георгиева Гочева-Илиева
4. Доц. д-р Илко Митков Русинов
5. Доц. д-р Димитър Георгиев Славов

Резерви:

1. Доц. д-р Маргарита Георгиева Грозева
2. Доц. д-р Татяна Иванова Куцарова

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

СЪДЪРЖАНИЕ

Съдържание	3
Обща характеристика на дисертационния труд	4
Актуалност на темата	4
Определяне на газовата температура	7
Цел и задачи на дисертационния труд	10
Основно съдържание на дисертационния труд	11
Глава 2 – Експериментална техника	12
Глава 3 – Описание на 2D модела за определяне на температурата на He-SrBr₂ лазер, възбуден в наносекунден надлъжен разряд	13
Постановка на 2D (r, z) модела	14
Числено решаване на задачата	18
Описание на итерационния метод	21
ГЛАВА 4 – Резултати от 2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд в хелий с малки добавки на неон, стронций и бром, възбуден в газоразрядна тръба с увеличен активен обем за мощен стронциев лазер	22
Коефициент на топлопроводност	22
Радиално и аксиално разпределение на газовата температура	23
ГЛАВА 5 – 2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд He-SrBr₂ възбуден във високотемпературна разновидност на газоразрядната тръба	25
Коефициент на топлопроводност	25
Радиално и аксиално разпределение на газовата температура	26
Заклучение	27
Приноси на дисертационния труд	28
Публикации по темата на дисертационния труд	28

Доклади на научни форуми	29
Литература	30

Обща характеристика на дисертационния труд

Лазерите с метални пари (ЛМП) са един от основните видове газови лазери, в чието историческо развитие България има съществен принос. Те могат да бъдат отделени на основата на това общо свойство, че в качеството на активни частици се използват атоми или йони на метали. Успехът на лазерите с метални пари, които са получили най-голямо развитие, се дължи на някои техни уникални характеристики, които не могат или е изключително трудно да бъдат постигнати от други лазери.

Като основен метод за получаване на генерация в метални пари се използва разряд в газова среда. В зависимост от разположението на лазерните нива и физическите процеси, определящи създаването на инверсна населеност, за възбуждане на лазерна генерация се използват различни видове стационарен и импулсен разряд. Импулсен разряд обикновено се използва в случаи, когато инверсия може да се създаде само за много кратко време на фронта на възбуждащия импулс (лазери на самоограничени преходи) или на задния фронт и в послесветенето на разряда (рекомбинационните лазери). Стационарен режим на генерация се осъществява при постоянно токово или високочестотно възбуждане в положителния стълб или отрицателното светене на тлеещ разряд. Като буферни газове се използват инертните газове He, Ne, Ar, Kr и Xe.

През 1972 година е пуснат в действие първият импулсен лазер с медни пари. Забележително е постижението на България с изобретяването и пускането в действие през 1974 година на първият в света медно-бромиден лазер, който е нискотемпературен вариант на медния лазер. Лабораторията по лазери на метални пари вече разполага с лазери с метални пари за прецизна обработка на метали и керамика.

Актуалност на темата

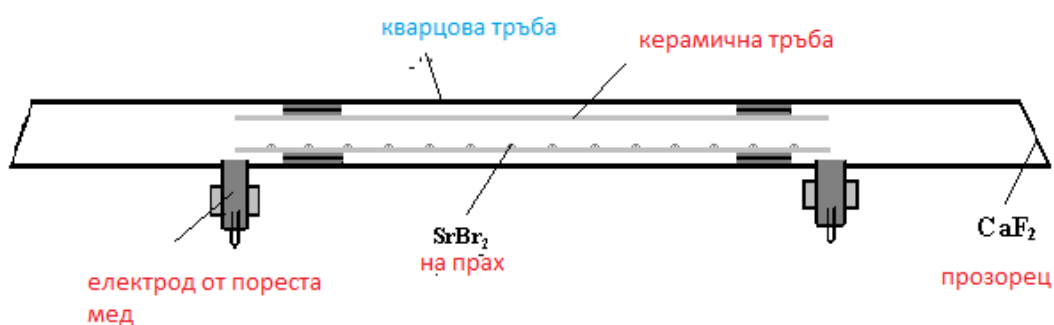
В последно време с помощта на лазера на свободни електрони (FEL) с променлива дължина на вълната между 3 и 20 μm , беше установено, че лазерното лъчение от 6,45 μm е най-ефективният инструмент за аблация на меките тъкани и кости с минимални увреждания и отлагания от изгорен материал [1-3]. Употребата на лазер на свободни електрони е възпрепятствано от неговите размери, цена и значителни режимни разходи.

Лазерът на стронциеви пари, който работи при 6.45- μm самоограничени атомни преходи, може да се приложи като заместител на лазера на свободни електрони. Импулсна генерация при различни напompващи механизми е получена при няколко атомни (2.06, 2.20,

2.69, 2.92, 3.01, 3.07, и 6.45 μm) и йонни (416 nm, 430 nm, 1.03 μm and 1.09 μm) линии посредством импулсен надлъжен разряд с буферен газ хелий. Лазерът на стронциеви пари има сравнително висока изходна мощност от 1.2-2 W [4, 5].

По аналогия с успешния опит от заместването на чиста мед с меден бромид като активна среда в лазера на медни пари стронциевият бромид SrBr_2 замени метала стронций като лазерна среда. Така беше преодоляно разрушаването на лазерните тръби поради химическата реакция с метала стронций. Добре известно е, че главното предимство при използването на медния бромид е намаляването на работната температура от 1600°C на 500°C . При заместването на стронций със стронциев бромид, температурата трябва да се увеличи от 650°C до 1100°C . По тази причина трябва да се използва керамична тръба. Средна изходна мощност от 60 mW беше достигната при едновременна генерация в средния инфрачервен диапазон, 30% от която е концентрирана при атомните линии [6].

Схема на разрядните тръби, използвани за He- SrBr_2 лазер, генериращ в средната инфрачервена (MIR) област е показана на Фиг. 1 [7-9]. Основната тръба е изработена от топен кварц. Керамична тръба, ограничаваща активна зона, е коаксиално разположена в основната тръба, съответно с вътрешен диаметър от 18 mm и 19.8 mm и с дължина от 70,5 cm и 98 cm съответно при първата и втората разрядна тръба. SrBr_2 на прах се поставя в керамичната тръба по нейната дължина. Необходимото налягане на парите за лазерна генерация се получава чрез разрядно нагряване, т.е. лазерът работи в самонагряващ режим.

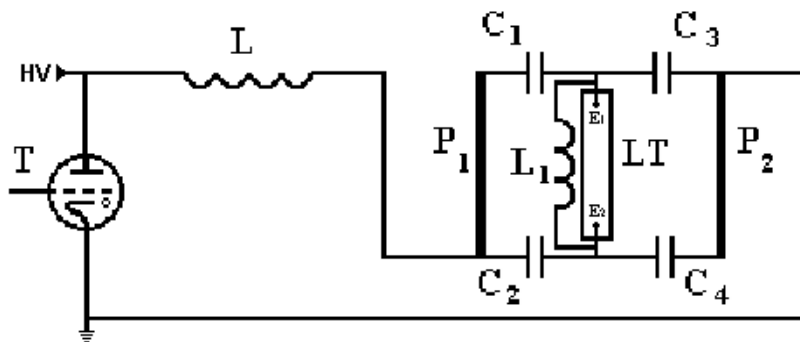


Фиг. 1. Конструкция на лазерната тръба

Лазерната тръба е обвита в слой фиброизолация, чиято дебелина зависи от входната мощност в разряда. Температурата на повърхността на кварцовата тръба се измерва с термодвойка, а електродите са изработени от пореста мед със специален дизайн, който ги

предпазва от замърсяване с SrBr_2 и Br_2 . Към краищата на кварцовата тръба са залепени прозорчета CaF_2 . Лазерният резонатор се състои от плоско огледало със златно покритие и плоскопаралелна пластина от CaF_2 . Дължината на резонатора е 1.40 m и 2.30 m съответно при първата и втората разрядна тръба.

Лазерът се възбужда посредством електрическа схема с взаимодействащи контури (IC схема). Ключът Т е водороден тиратрон TGI 1000/25. Металните пластини, P_1 и P_2 , със полуцилиндрична форма са направени от дуралуминий и са разположени близо до лазерната тръба. Чрез вариране на четирите кондензатора (C_1, \dots, C_4), образуващи кондензаторна батерия (СВ), зареждана от високоволтов (HV) изправител както и на съгласуващата индуктивност L, могат успешно да се променят и контролират амплитудите, формите и продължителностите на импулсите на разрядния ток и напрежението на тръбата, както и фазовото отместване между тях. Импулсната възбуждаща схема може да осигури импулси на напрежение и разрядния ток с амплитуди съответно до 20 kV и 500 A, продължителност на възбуждащия импулс от 50–300 ns и честота на повторение на възбуждащите импулси от 5–30 kHz. По този начин са открити подходящи разрядни условия за различни възбуждащи процеси, като възбуждане чрез електронни удари, зарядообмен, Пенингова йонизация и др., и оттам изходните параметри за различни атомни и йонни лазери бяха увеличени от 35 % до два пъти в сравнение с често използваните импулсни възбуждащи схеми.



Фиг. 2. Схема на възбуждащата верига: $C_1 \div C_4$ - кондензатори; L and L_1 - индуктивности; P_1 and P_2 – метални пластини; LT – лазерна тръба; Т - тиратрон. Лазерът се възбужда посредством електрическа схема с взаимодействащи контури.

При първата лазерна тръба: за MIR стронциеви атомни и йонни линии е достигната обща средна изходна мощност от 2.4 W, повече от 80 % от която е концентрирана при 6.45- μm Sr атомна линия [7]. За втората тръба обща изходна мощност от 4.26 W е измерена при многолинейния изход, повече от 90% от която е концентрирана при 6.45- μm Sr атомна линия [8, 9].

Увеличението на активният обем от 180 cm^3 до 300 cm^3 (67%) води до нарастване на изходната лазерни параметри, както следва [7-9]:

- 1) общата средна изходна мощност от 2.4 до 4.3 W (80%);
- 2) лазерната ефективност при максимални лазерни изходни параметри, от 0.13% до 0.20% (54%);
- 3) средната изходна мощност при 6.45 μm линия, от 1.9 до 3.9 W (два пъти);
- 4) лазерната импулсна енергия от при 6.45 μm от 0.1 до 0.2 mJ (два пъти) [140-142].

По време на изследването на SrBr₂ лазер разрядната тръба работи около 100 часа с разход на материал около 0.25 g за час. Резултатите получени с втората тръба са два пъти по-високи от тези получени при чист стронций.

Изследването на стронциевия лазер, възбуден чрез наносекунден надлъжен He-SrBr₂ разряд, показва че стронциевият бромид може да замени метала стронций като активна среда. Въпреки високата работна температура затрудненията с разрушаването на лазерната тръба са преодоленни.

Съществуват няколко метода за увеличаване на средната изходна мощност при лазери, работещи на самоограничени преходи. По-нататъшно нарастване на изходните параметри на лазер на SrBr₂ се достига чрез увеличаване на активния обем по диаметър и дължина, допълнително пречистване на SrBr₂ и изследване на влиянието на различни добавки към буферния газ. На основата на опита с лазера на пари на CuBr по нататъшно нарастване на изходните параметри може да се получи чрез увеличение на активния обем, допълнително пречистване на SrBr₂ и подробно изследване на влиянието на някои добавки към буферния газ върху лазерната мощност.

Определяне на газовата температура

Добре е известно, че газовата температура е един от основните параметри на газоразрядната плазма, от който зависи взаимодействието на тежките частици в плазмата, концентрацията и разпределението на излъчващите частици, стабилността на газовия разряд и т.н.

Експерименталното или теоретично определяне на газовата температура е от основно значение и следователно е приложимо за проблеми в различни области, като газоразрядната лазерна физика, плазмените технологии, газоразрядната мас-спектроскопия, абсорбционна и емисионна спектроскопия и в плазмата като цяло. Също така е добре известно, че широко използваните техники за експериментално определяне на газовата температура, използвайки измерване на Доплеровото уширение на спектралните линии и фокусното разстояние на термичните лещи са определено неточни и са с недопустима експерименталната грешка.

Ако приемем, че температурата на газа се променя само радиално и като се има предвид равномерно или неравномерно консумираната мощност, досега е изчислявано

разпределението на температурата на газа чрез аналитично решаване на уравнението на топлопроводността за наносекундни импулси в надлъжен разряд в редица газоразрядни тръби [10-12]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk \frac{dT}{dr} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

където k е коефициентът на топлопроводност на газа, T е температурата му, а q_v е енергията, вложена в разряда, за единица обем. Дебелините на керамичната и кварцова тръба се пренебрегват.

Коефициентът на топлопроводност k отразява различната способност на телата да провеждат топлината навътре в своята маса. При високи температури k зависи от температурата на средата. Зависимостта на топлопроводността k на хелий или неон се дава с формулата

$$k = k_0 (T)^m, \quad (2)$$

където k_0 и m са константи (в рамките на определен температурен интервал), които са специфични за всеки газ. Тези константи се получават чрез наслагване на съответните експериментални данни. За хелий k_0 и m са равни на $29.7 \cdot 10^{-4}$ и 0.691 , съответно.

Ако разглеждаме две зони – разрядна зона $0 \leq r \leq R_1$ и свободна от разряд зона $R_1 \leq r \leq R_2$, математическият модел на топлинните процеси се описва със следните уравнения и допълнителни условия:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk_1 (T^{(1)}) \frac{dT^{(1)}}{dr} \right) + q_v = 0, \quad 0 < r < R_1, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk_2 (T^{(2)}) \frac{dT^{(2)}}{dr} \right) = 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad (4)$$

$$T^{(1)}(R_1 - 0) = T^{(2)}(R_1 + 0), \quad (5)$$

$$k_1 (T^{(1)}) \frac{dT^{(1)}}{dr} \Big|_{R_1-0} = k_2 (T^{(2)}) \frac{dT^{(1)}}{dr} \Big|_{R_1+0}, \quad (6)$$

$$\frac{dT^{(1)}}{dr} \Big|_{r=0} = 0, \quad (7)$$

$$T^{(2)}(R_2) = T_w, \quad (8)$$

където

$$k_1 (T^{(1)}) = k_0 [T^{(1)}]^m, \quad k_2 (T^{(2)}) = k_0 [T^{(2)}]^m, \quad k_0 = const, \quad m = const.$$

Уравненията (3) и (4) описват топлопредаването в двете зони; условията за спрягане (5) и (6) моделират "идеален контакт" между двете зони; условие (7) означава симетрия на решението по отношение на нулата; условие (8) задава температурата, която се поддържа по външната стена на тръбата.

Като се използват изчислените коефициенти на топлопроводност чрез фитинг на експерименталните данни, твърда сфера и 12-б Ленард-Джоунс апроксимации за вътрешно атомни взаимодействия, аналитичното решение на задача (3)-(8) е намерено в [7] за различни конструкции на разрядните тръби при равномерна и неравномерна входна електрическа мощност. Средната газова температура също така е намерена чрез усредняване на радиалното разпределение на температурата по радиуса. То има следния вид:

- в разрядната зона:

$$T^{(1)}(r) = \left[T_0^{1+m} + \frac{q_v(m+1)}{4k_0} (R_1^2 - r^2) \right]^{1/(1+m)}, \quad 0 \leq r \leq R_1,$$

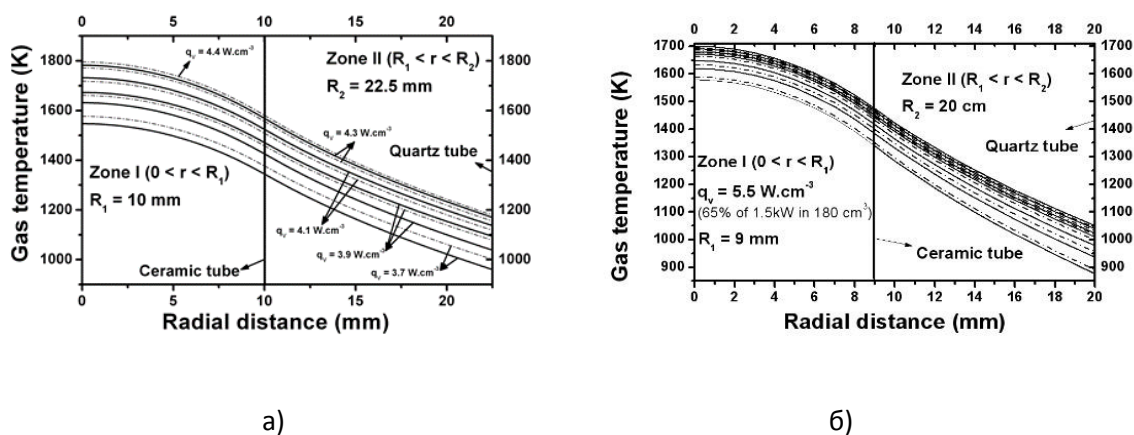
където

$$T_0 = \left[T_w^{1+m} + \frac{q_v(m+1)}{2k_0} R_1^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \right]^{1/(1+m)};$$

- в свободната от разряд зона:

$$T^{(2)}(r) = \left[T_w^{1+m} + \frac{q_v(m+1)}{2k_0} R_1^2 \ln \frac{R_2}{r} \right]^{1/(1+m)}, \quad R_1 \leq r \leq R_2.$$

На Фиг. 3 е показано радиалното разпределение на газова температура за първата (а) и втората (б) лазерни тръби [7-9].



Фиг. 3. Радиално разпределение на газова температура за първа и втора разрядна тръба

Намирането на аналитично решение на гореспоменатата задача за 2D (r, z) и 3D (r, φ, z) случаи среща непреодолими препятствия. Това налага използването на **метода на изчислителния експеримент (ИЕ)**. Този метод се наложи през последните 45-50 години като мощен метод за приближено решаване на големи научно-технически задачи и в частност на математически модели, описващи сложни физически процеси. Това стана възможно поради бурното развитие на числените методи и на компютърната техника. Методът на изчислителния експеримент е нов метод за теоретично изследване на сложни реални процеси, допускащи математическо моделиране. 2D численото моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен He-SrBr₂ разряд за мощен стронциев лазер е резултат от неприложимостта на експериментален или аналитичен подход за изясняване на разпределението на температурата вътре в лазера.

Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на казаното дотук за цел на дисертацията се поставя разработването на 2D модел за мощен He-SrBr₂ лазер със значително увеличен активен обем. За постигане на тази цел се поставят следните задачи:

1. Определяне на газовата температура в проектираната нова тръба без допълнителна термична изолация.

2. Съставяне на 2D числен модел за температурата за разработената високотемпературната разновидност на тръбата с допълнителна термична изолация.

✚ По първата задача да се изследва и разработи на 2D модел при увеличение на активния обем чрез по-голям вътрешен диаметър и дължината на лазерната тръба на Sr възбуден в наносекунден импулсен надлъжен разряд.

✚ По втората задача имайки предвид осева симетрия и еднородна входяща мощност, 2D моделът (r, z) е разработен чрез числени методи и за определяне на газовата температура и в новата високотемпературна разрядна тръба при допълнителна некомпактна изолация в свободната от разряд зона, за да се получи оптималният температурен режим за достигане на максимална средна изходна мощност.

✚ Последна задача е разработване на план бъдещото приложение при нови подобни експериментални постановки като се отчитат резултатите от настоящото числено решение.

По първа и втора задача за разработването на модела се следват основните стъпки при провеждане на изчислителния експеримент, а именно

- Математическо моделиране на процеса

- Построяване на числен метод за приближено решаване на задачата, написване на изчислителен алгоритъм.
- Програмиране на изчислителния алгоритъм
- Провеждане на числени пресмятания с помощта на написаната програма.
- Анализ на получените числени резултати и уточняване на математическия модел.

Основно съдържание на дисертационния труд

Структурата на дисертацията е увод, пет глави и заключение. Обемът на дисертацията е 125 страници, които включват 21 фигури и 4 таблици. Цитирани са 145 литературни източника.

Първа глава е посветена на развитието и особеностите на работата на лазерите с метални пари, генериращи на самоограничени атомни преходи и на йонни преходи. Разгледани са основните механизми за създаване на инверсна населеност и различните методи за получаване на метални пари. Подробно е разгледан стронциевият атомен лазер като основен тип лазер при провежданите експерименти.

Във втора глава накратко е описана експерименталната техника и някои детайли на провежданите експерименти, които в голяма степен са общи за всички проведени изследвания.

В глава трета е представено основното иновативно съдържание, а именно описанието на двумерния модел за решаване на стационарното уравнение на топлопроводността при стронциев лазер.

В четвърта глава е представено 2D числено моделиране на разпределението на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд в хелий с малки добавки на неон, стронций и бром, резултатите от него и тяхното интерпретиране.

В пета глава се описва 2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд He-SrBr₂ възбуден във високотемпературна газоразрядна тръба за мощен стронциев лазер.

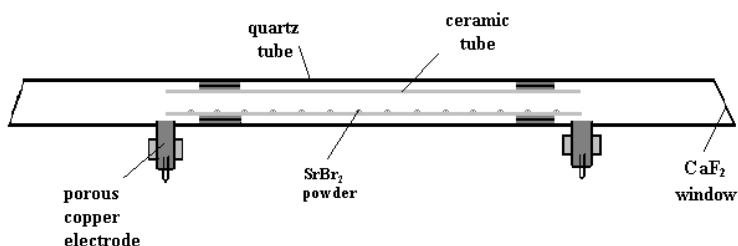
Численият 2D (r, z) модел на разпределението на газовата температура е разработен за случая на осева симетрия и равномерна входяща мощност при нова високотемпературна тръба с допълнителна некомпактна изолация в свободната от разряд зона, за да се намери оптималният термичен режим за достигане на максимални изходни лазерни параметри. Чрез този модел се определя температурата на газа в надлъжен разряд от наносекундни импулси в хелий с малка добавка на неон, стронций и бром.

В заключението са формулирани принципните резултати, т.е. как са изпълнени поставените цели, оценени са експерименталните грешки - чрез съпоставяне с резултатите от аналитичното решение.

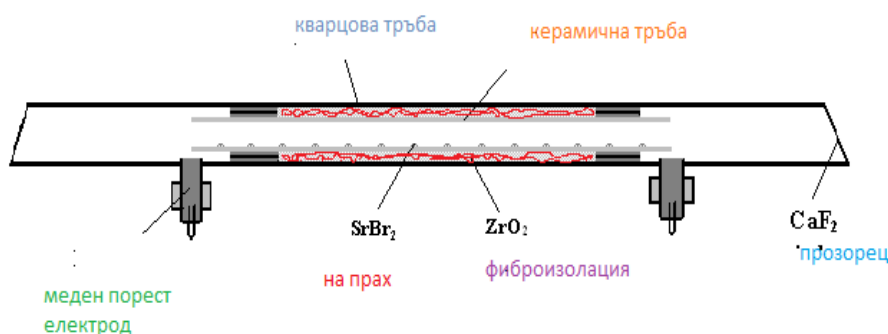
ГЛАВА 2 – ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ТЕХНИКА

Тръба 1, Използвана при 2D моделирането на температурата

Фигура 4 а)



Тръба 2, Използвана при 2D моделирането на температурата



Фигура 4 б)

Схематична диаграма на новата високо температурна разрядна тръба с увеличен активен обем е показана на **Фигура 4 б**. Основната тръба с вътрешен диаметър 71.5 мм и външен диаметър 76 мм е направена от топен кварц. Керамична тръба, направена от Al_2O_3 , е коаксиално поставена в основната тръба и ограничава разряда в област с размери с вътрешен диаметър 30.5-мм и външен диаметър 38.5 мм с дължина 98 см. По дължината на керамичната тръба е поставен $SrBr_2$ на прах. Зоната между керамичната тръба, основната кварцова тръба и държачите на керамичната тръба са некомпактно запълнени с фиброизолация от ZrO_2 .

ГЛАВА 3 – Описание на 2D модела за определяне на температурата на He-SrBr₂ лазер, възбуден в наносекунден надлъжен разряд

Както е казано в увода, намирането на аналитично решение на гореспоменатата задача за 2D (r, z) и 3D (r, φ, z) случаи среща непреодолими препятствия. Затова използваме метода на изчислителния експеримент.

Да разгледаме подробно каква е същността на ИЕ. Ако искаме да изучим някакъв физически процес с използването на ИЕ, то трябва да преминем през няколко етапа.

Същност и етапи на метода:

Първи етап: Математическо моделиране на процеса. Това означава указване на съвкупността от търсените и известните величини и връзките между тях. Уравненията на математическата физика най-често са диференциални уравнения (обикновени или частни), а също така и интегрални и интегро-диференциални уравнения. Обикновено те изразяват закони за запазване на физически величини (енергия, маса и др.) и като правило са нелинейни. [128, 129]

След съставяне на математическия модел, трябва да се извърши изследването му с помощта на общата теория на диференциалните и интегралните уравнения, т. е. да се провери дали задачата е разрешима и има ли тя единствено решение, дали решението не може да се напише в явен вид или да се намерят частни решения. Частните решения са важни за получаване на първична информация за характера на процеса а също и като тестови примери за проверка на качествата на числените алгоритми.

Втори етап: Построяване на числен метод за приближено решаване на задачата, написване на изчислителен алгоритъм.

Трети етап: Програмиране на изчислителния алгоритъм.

Четвърти етап: Провеждане на числени пресмятания с помощта на написаната програма.

Пети етап: Анализ на получените числени резултати и уточняване на математическия модел.

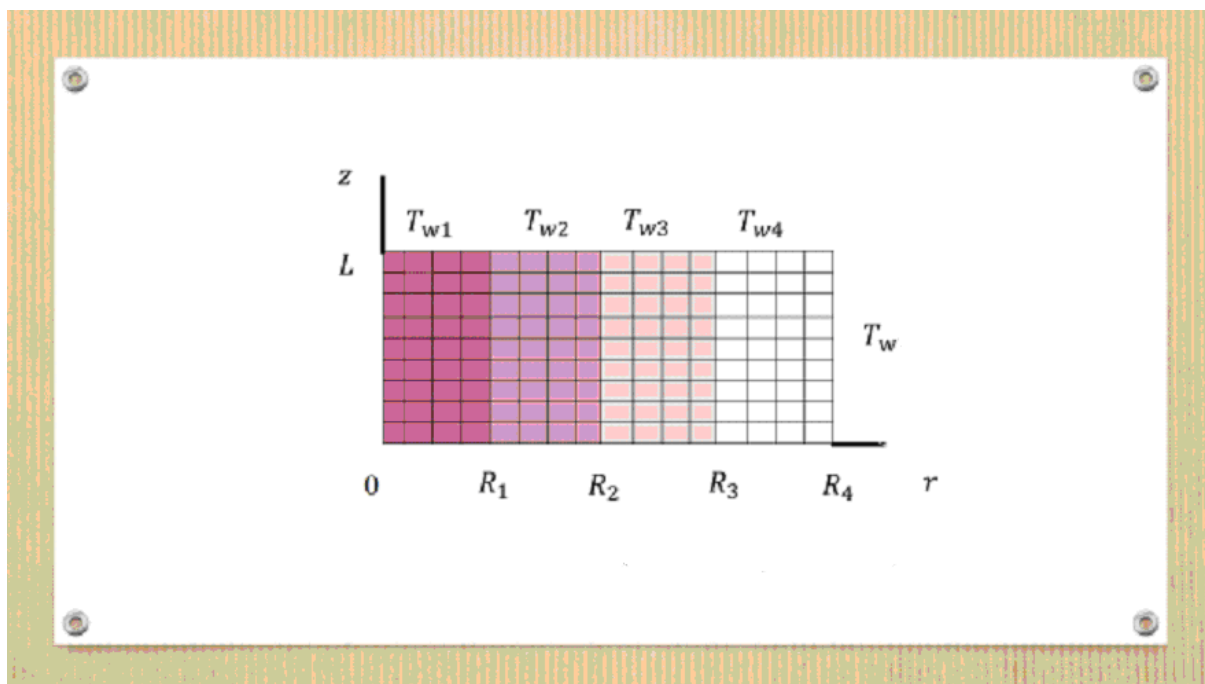
При разглежданите в настоящата дисертация конкретни задачи за числено решаване на математическите модели, които се състоят от диференциални уравнения и допълнителни условия, се прилага *методът на крайните разлики* (МКР), наречен още *метод на диференчните схеми*. Той свежда решаването на диференциалните уравнения до решаването на система алгебрични уравнения.

Математическият 2D (r, z) модел на температурата на газа е разработен за случая на осева симетрия и еднаква (равномерна) входяща мощност. Чрез този модел се определя температурата на газа в надлъжен разряд от *наносекундни* импулси в хелий с малка добавка на неон, стронций и бром.

Имайки предвид осева симетрия и равномерна входяща мощност, 2D моделът (r, z) е разработен за определяне на газовата температура на стационарното уравнение на топлопроводността в случая на една разрядна зона с $q_v \neq 0$ с радиус R_1 и три свободни от разряд зони (за които $q_v = 0$), а именно: керамична тръба с граници (R_1, R_2) , газообразно разрядна област с граници (R_2, R_3) и основната тръба, направена от топен кварц, с граници (R_3, R_4) .

Постановка на 2D (r, z) модела

На Фиг. 5. е представена схематично областта, съставена от разглежданите четири зони.



Фигура 5

Разглеждаме задачата

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_1(T^{(1)}) \frac{\partial T^{(1)}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_1(T^{(1)}) \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z} \right) + q_v = 0, \quad 0 < r < R_1, \quad 0 < z < L, \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_2(T^{(2)}) \frac{\partial T^{(2)}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_2(T^{(2)}) \frac{\partial T^{(2)}}{\partial z} \right) = 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad 0 < z < L, \quad (10)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_3(T^{(3)}) \frac{\partial T^{(3)}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3(T^{(3)}) \frac{\partial T^{(3)}}{\partial z} \right) = 0, \quad R_2 < r < R_3, \quad 0 < z < L, \quad (11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_4(T^{(4)}) \frac{\partial T^{(4)}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_4(T^{(4)}) \frac{\partial T^{(4)}}{\partial z} \right) = 0, \quad R_3 < r < R_4, \quad 0 < z < L, \quad (12)$$

$$T^{(1)}(R_1 - 0, z) = T^{(2)}(R_1 + 0, z), \quad 0 \leq z \leq L, \quad (13)$$

$$k_1(T^{(1)}) \frac{\partial T^{(1)}}{\partial r} \Big|_{R_1-0} = k_2(T^{(2)}) \frac{\partial T^{(2)}}{\partial r} \Big|_{R_1+0},$$

$$T^{(2)}(R_2 - 0, z) = T^{(3)}(R_2 + 0, z), \quad 0 \leq z \leq L, \quad (14)$$

$$k_2(T^{(2)}) \frac{\partial T^{(2)}}{\partial r} \Big|_{R_2-0} = k_3(T^{(3)}) \frac{\partial T^{(3)}}{\partial r} \Big|_{R_2+0},$$

$$T^{(3)}(R_3 - 0, z) = T^{(4)}(R_3 + 0, z), \quad 0 \leq z \leq L, \quad (15)$$

$$k_3(T^{(3)}) \frac{\partial T^{(3)}}{\partial r} \Big|_{R_3-0} = k_4(T^{(4)}) \frac{\partial T^{(4)}}{\partial r} \Big|_{R_3+0},$$

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad 0 \leq z \leq L, \quad (16)$$

$$T^{(4)} \Big|_{r=R_4} = T_w, \quad 0 \leq z \leq L, \quad (17)$$

$$T^{(1)} \Big|_{z=0} = T^{(1)} \Big|_{z=L} = T_{w,1}, \quad 0 \leq r < R_1, \quad (18)$$

$$T^{(1)} \Big|_{z=0} = T^{(1)} \Big|_{z=L} = 0.5(T_{w,1} + T_{w,2}), \quad r = R_1,$$

$$T^{(2)}\Big|_{z=0} = T^{(2)}\Big|_{z=L} = T_{w,2}, \quad R_1 < r < R_2, \quad (19)$$

$$T^{(2)}\Big|_{z=0} = T^{(2)}\Big|_{z=L} = 0.5(T_{w,2} + T_{w,3}), \quad r = R_2,$$

$$T^{(3)}\Big|_{z=0} = T^{(3)}\Big|_{z=L} = T_{w,3}, \quad R_2 < r < R_3, \quad (20)$$

$$T^{(3)}\Big|_{z=0} = T^{(3)}\Big|_{z=L} = 0.5(T_{w,3} + T_{w,4}), \quad r = R_3,$$

$$T^{(4)}\Big|_{z=0} = T^{(4)}\Big|_{z=L} = T_{w,4}, \quad R_3 < r \leq R_4, \quad (21)$$

където

$$k_1 = k_0 [T^{(1)}]^m, \quad k_2 = k'_0 [T^{(2)}]^{m'}, \quad k_3 = k_0 [T^{(3)}]^m, \quad k_4 = k''_0 [T^{(4)}]^{m''}, \quad (22)$$

$$k_0 = const, \quad m = const, \quad k'_0 = const, \quad m' = const, \quad k''_0 = const, \quad m'' = const.$$

Уравненията (9)-(12) са стационарни уравнения на топлопроводността в двумерния (r, z) случай за всяка една от четирите зони, записани в полярни координати. Условието (13)-(15) са така наречените условия за идеален контакт (непрекъснатост на температурата и потока). Условие (16) е гранично условие за симетрия по оста на цилиндъра, а условие (17) задава температурата по стената на тръбата. Условието (18)-(21) задават температурите на отделните зони при $z = 0$ и $z = L$, като в точката на контакт между две зони се приема, че температурата е равна на средното аритметично на стойностите на температурите в двете съседни зони. Задача (9)-(22) е нелинейна, защото коефициентите ѝ зависят от търсеното решение.

Както казахме по-рано, формулираната задача (9)-(22) не може да бъде решена аналитично. Затова в дисертацията тази задача се решава с помощта на числени методи и точно с метода на крайните разлики (диференчни схеми).

За да се напише диференчна схема, апроксимираща дадената диференциална задача, най-напред трябва да се направи *дискретизация на областта*, т. е. да се замени областта на непрекъснато изменение на аргумента с област на дискретно изменение. В случая това означава в правоъгълника $D = \{(r, z) : 0 \leq r \leq R_4, 0 \leq z \leq L\}$ да се въведе мрежа от точки. След въвеждането на мрежата, трябва да се направи *дискретизация на задачата* т. е. да се заменят основните диференциални уравнения и допълнителните условия с дискретни аналози.

В разглежданата област D въвеждаме правоъгълна равномерна мрежа от точки и всички производни заменяме с техни приближения. В резултат получаваме система нелинейни алгебрични уравнения (защото задачата е нелинейна), която се решава с помощта на итерационен метод. Итерационният метод е метод, при който тръгваме от някакво начално приближение на решението (обикновено много грубо приближение на търсено решение), което последователно подобряваме.

Уравненията на математическата физика изразяват закони за съхранение - в случая закона за съхранение на енергията (или още на топлината) в диференциална форма. Методът на крайните разлики физически означава преход от непрекъснатата среда към някакъв дискретен неин модел. Задачи като тази, отразяващи закони за съхранение, се формулират с помощта на основно диференциално уравнение и гранични условия. Естествено е да искаме съответните закони да останат в сила и за диференчните схеми, които апроксимират разглежданите диференциални задачи. Диференчни схеми които запазват законите за съхранение върху мрежата се наричат *консервативни*.

Не е целесъобразно да се строят диференчни схеми и да се съставят програми предназначени само за решаване на отделни задачи от частен вид. Изискването за еднообразие на изчислителния алгоритъм води до понятието *хомогенни диференчни схеми*. Това са диференчни схеми, видът на които не зависи от избора на конкретната задача - във всички възли на мрежата за всяка задача от разглеждания клас диференчните уравнения имат един и същ вид. Коефициентите на диференчната схема се пресмятат с помощта на коефициентите на диференциалното уравнение и зависят от стъпката на мрежата като от параметър, но не зависят от възела на мрежата и от конкретния избор на коефициентите.

За построяване на консервативни диференчни схеми се използва *интегро-интерполационният метод (методът на баланса)*. Използването му е наложително при променливи и особено при прекъснати коефициенти. Ние също използваме този метод за построяване на диференчна схема за задача (9)-(21).

Числено решаване на задачата

В правоъгълника $D = \{(r, z) : 0 \leq r \leq R_4, 0 \leq z \leq L\} = [0, R_4] \times [0, L]$ въвеждаме правоъгълна равномерна мрежа и по двете направления така, че правите $r = 0$, $r = R_1$, $r = R_2$, $r = R_3$, $r = R_4$ да са прави от мрежата:

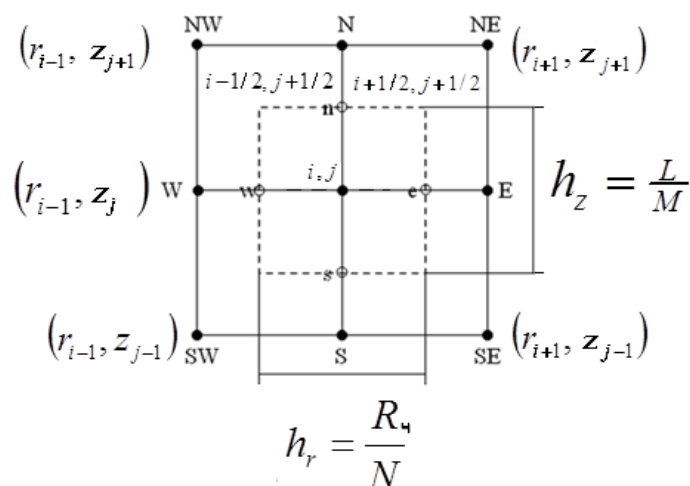
$$\bar{\omega}_{h_r, h_z} = \bar{\omega}_{h_r} \times \bar{\omega}_{h_z},$$

където

$$\bar{\omega}_{h_r} = \{r_i = (i-1)h_r, i = 1, 2, \dots, N_1+1, N_1+2, \dots, N_2+1, N_2+2, \dots, N_3+1, N_3+2, \dots, N_4+1,$$

$$N_1 h_r = R_1, \quad N_2 h_r = R_2, \quad N_3 h_r = R_3, \quad N_4 h_r = R_4 \},$$

$$\bar{\omega}_{h_z} = \{z_j = (j-1)h_z, j = 1, 2, \dots, M+1, M h_z = L\}.$$



Фи.6

За получаване на диференчна апроксимация използваме метода на баланса. Ако означим с $T_{i,j}$ стойността на приближеното решение във възела (r_i, z_j) , т. е. $T_{i,j} = T(r_i, z_j)$, то получаваме следната система от диференчни уравнения:

- за $i = 1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$a_{2,j}(T^{(1)}) \frac{T_{2,j}^{(1)} - T_{1,j}^{(1)}}{h_r} h_z + \left[b_{1,j+1}(T^{(1)}) \frac{T_{1,j+1}^{(1)} - T_{1,j}^{(1)}}{h_z} - b_{1,j}(T^{(1)}) \frac{T_{1,j}^{(1)} - T_{1,j-1}^{(1)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{4} + \bar{q}_v h_z \frac{h_r}{4} = 0;$$

- за $i = 2, 3, \dots, N_1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_i} \left[r_{i+1/2} a_{i+1,j} (T^{(1)}) \frac{T_{i+1,j}^{(1)} - T_{i,j}^{(1)}}{h_r} - r_{i-1/2} a_{i,j} (T^{(1)}) \frac{T_{i,j}^{(1)} - T_{i-1,j}^{(1)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{i,j+1} (T^{(1)}) \frac{T_{i,j+1}^{(1)} - T_{i,j}^{(1)}}{h_z} - b_{i,j} (T^{(1)}) \frac{T_{i,j}^{(1)} - T_{i,j-1}^{(1)}}{h_z} \right] h_r + \bar{q}_v h_r h_z = 0;$$

- за $i = N_1 + 1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_{N_1+1}} \left[r_{N_1+3/2} a_{N_1+2,j} (T^{(2)}) \frac{T_{N_1+2,j}^{(2)} - T_{N_1+1,j}^{(2)}}{h_r} - r_{N_1+1/2} a_{N_1+1,j} (T^{(1)}) \frac{T_{N_1+1,j}^{(1)} - T_{N_1,j}^{(1)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{N_1+1,j+1} (T^{(2)}) \frac{T_{N_1+1,j+1}^{(2)} - T_{N_1+1,j}^{(2)}}{h_z} - b_{N_1+1,j} (T^{(2)}) \frac{T_{N_1+1,j}^{(2)} - T_{N_1+1,j-1}^{(2)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} +$$

$$+ \left[b_{N_1+1,j+1} (T^{(1)}) \frac{T_{N_1+1,j+1}^{(1)} - T_{N_1+1,j}^{(1)}}{h_z} - b_{N_1+1,j} (T^{(1)}) \frac{T_{N_1+1,j}^{(1)} - T_{N_1+1,j-1}^{(1)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} + \frac{\bar{q}_v h_r h_z}{2} = 0;$$

- за $i = N_1 + 2, N_1 + 3, \dots, N_2, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_i} \left[r_{i+1/2} a_{i+1,j} (T^{(2)}) \frac{T_{i+1,j}^{(2)} - T_{i,j}^{(2)}}{h_r} - r_{i-1/2} a_{i,j} (T^{(2)}) \frac{T_{i,j}^{(2)} - T_{i-1,j}^{(2)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{i,j+1} (T^{(2)}) \frac{T_{i,j+1}^{(2)} - T_{i,j}^{(2)}}{h_z} - b_{i,j} (T^{(2)}) \frac{T_{i,j}^{(2)} - T_{i,j-1}^{(2)}}{h_z} \right] h_r = 0;$$

- за $i = N_2 + 1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_{N_2+1}} \left[r_{N_2+3/2} a_{N_2+2,j} (T^{(3)}) \frac{T_{N_2+2,j}^{(3)} - T_{N_2+1,j}^{(3)}}{h_r} - r_{N_2+1/2} a_{N_2+1,j} (T^{(2)}) \frac{T_{N_2+1,j}^{(2)} - T_{N_2,j}^{(2)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{N_2+1,j+1} (T^{(3)}) \frac{T_{N_2+1,j+1}^{(3)} - T_{N_2+1,j}^{(3)}}{h_z} - b_{N_2+1,j} (T^{(3)}) \frac{T_{N_2+1,j}^{(3)} - T_{N_2+1,j-1}^{(3)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} +$$

$$+ \left[b_{N_2+1,j+1} (T^{(2)}) \frac{T_{N_2+1,j+1}^{(2)} - T_{N_2+1,j}^{(2)}}{h_z} - b_{N_2+1,j} (T^{(2)}) \frac{T_{N_2+1,j}^{(2)} - T_{N_2+1,j-1}^{(2)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} = 0;$$

- за $i = N_2 + 2, N_2 + 3, \dots, N_3, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_i} \left[r_{i+1/2} a_{i+1,j} (T^{(3)}) \frac{T_{i+1,j}^{(3)} - T_{i,j}^{(3)}}{h_r} - r_{i-1/2} a_{i,j} (T^{(3)}) \frac{T_{i,j}^{(3)} - T_{i-1,j}^{(3)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{i,j+1} (T^{(3)}) \frac{T_{i,j+1}^{(3)} - T_{i,j}^{(3)}}{h_z} - b_{i,j} (T^{(3)}) \frac{T_{i,j}^{(3)} - T_{i,j-1}^{(3)}}{h_z} \right] h_r = 0;$$

- за $i = N_3 + 1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$\frac{1}{r_{N_3+1}} \left[r_{N_3+3/2} a_{N_3+2,j} (T^{(4)}) \frac{T_{N_3+2,j}^{(4)} - T_{N_3+1,j}^{(4)}}{h_r} - r_{N_3+1/2} a_{N_3+1,j} (T^{(3)}) \frac{T_{N_3+1,j}^{(3)} - T_{N_3,j}^{(3)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{N_3+1,j+1} (T^{(4)}) \frac{T_{N_3+1,j+1}^{(4)} - T_{N_3+1,j}^{(4)}}{h_z} - b_{N_3+1,j} (T^{(4)}) \frac{T_{N_3+1,j}^{(4)} - T_{N_3+1,j-1}^{(4)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} +$$

$$+ \left[b_{N_3+1,j+1} (T^{(3)}) \frac{T_{N_3+1,j+1}^{(3)} - T_{N_3+1,j}^{(3)}}{h_z} - b_{N_3+1,j} (T^{(3)}) \frac{T_{N_3+1,j}^{(3)} - T_{N_3+1,j-1}^{(3)}}{h_z} \right] \frac{h_r}{2} = 0;$$

- за $i = N_3 + 2, N_3 + 3, \dots, N_4, j = 2, 3, \dots, M$ имама

$$\frac{1}{r_i} \left[r_{i+1/2} a_{i+1,j} (T^{(4)}) \frac{T_{i+1,j}^{(4)} - T_{i,j}^{(4)}}{h_r} - r_{i-1/2} a_{i,j} (T^{(4)}) \frac{T_{i,j}^{(4)} - T_{i-1,j}^{(4)}}{h_r} \right] h_z +$$

$$+ \left[b_{i,j+1} (T^{(4)}) \frac{T_{i,j+1}^{(4)} - T_{i,j}^{(4)}}{h_z} - b_{i,j} (T^{(4)}) \frac{T_{i,j}^{(4)} - T_{i,j-1}^{(4)}}{h_z} \right] h_r = 0;$$

- за $i = N_4 + 1, j = 2, 3, \dots, M$:

$$T_{N_4+1,j}^{(4)} = T_w;$$

- за $i = 1, 2, \dots, N_1, j = 1, M$:

$$T_{i,1}^{(1)} = T_{i,M}^{(1)} = T_{w,1};$$

- за $i = N_1 + 2, N_1 + 3, \dots, N_2, j = 1, M$:

$$T_{i,1}^{(2)} = T_{i,M}^{(2)} = T_{w,2};$$

- за $i = N_2 + 2, \dots, N_3, j = 1, M$:

$$T_{i,1}^{(3)} = T_{i,M}^{(3)} = T_{w,3};$$

- за $i = N_3 + 2, \dots, N_4, j = 1, M$

$$T_{i,1}^{(4)} = T_{i,M}^{(4)} = T_{w,4};$$

- за $i = N_1 + 1, j = 1, M$:

$$T_{N_1+1,1}^{(1)} = T_{N_1+1,1}^{(2)} = T_{N_1+1,M}^{(1)} = T_{N_1+1,M}^{(2)} = \frac{T_{w,1} + T_{w,2}}{2};$$

- за $i = N_2 + 1, j = 1, M$:

$$T_{N_2+1,1}^{(2)} = T_{N_2+1,1}^{(3)} = T_{N_2+1,M}^{(2)} = T_{N_2+1,M}^{(3)} = \frac{T_{w,2} + T_{w,3}}{2};$$

- за $i = N_3 + 1, j = 1, M$:

$$T_{N_3+1,1}^{(3)} = T_{N_3+1,1}^{(4)} = T_{N_3+1,M}^{(3)} = T_{N_3+1,M}^{(4)} = \frac{T_{w,3} + T_{w,4}}{2}.$$

Описание на итерационния метод

Същността на итерационните процеси се състои в това, че те позволяват тръгвайки от някакво начално приближение на търсена величина y_0 (обикновено доста грубо приближаващо търсената величина) последователно да се намират все по-добри приближения y_1, y_2, \dots, y_s , наречени итерации.

Получената система нелинейни алгебрични уравнения решаваме с помощта на итерационен метод. Използваме следния итерационен метод:

- за нулева итерация избираме $T^{(1)} = T^{(2)} = T^{(3)} = T^{(4)} \equiv 0$;
- при определяне на решението на $(s + 1)$ -вата итерация, коефициентите на системата пресмятаме по стойностите на решението на s -тата итерация;
- итерационния процес прекратяваме или при достигнат максимален брой итерации *maxiter*, зададен предварително, или при достигане на определена отнапред зададена точност ε , т. е. прекратяваме итерационния процес ако $s = \text{maxiter}$ или

$$\max_{\substack{1 \leq i \leq N_4+1 \\ 1 \leq j \leq M}} \left| T_{i,j}^{(s+1)} - T_{i,j}^{(s)} \right| < \varepsilon.$$

ГЛАВА 4 – Резултати от 2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд в хелий с малки добавки на неон, стронций и бром, възбуден в газоразрядна тръба с увеличен активен обем за мощен стронциев лазер

Резултатите от 2D(r,z) числено моделиране на газовата температура в наносекунден надлъжен He-Ne-SrBr₂ разряд при разнообразни смеси са представени при осева симетрия и равномерна входяща мощност.

Където $q_v = 1.9 \text{ W.cm}^{-3}$ е мощността депозирана в разрядната зона за единица обем.

Коефициент на топлопроводност

Зависимостта на коефициентът на топлопроводност k на газовете и газовите смеси е от вида $k = k_0 T_g^m$, където k_0 и m са константи (в определени температурни граници), които са специфични за всяка газообразна или твърда среда. Константите k_0 и m , които определят коефициента на топлопроводността, могат да се получат чрез фитинг на съществуващите експериментални данни. Съществуват два широко използвани теоретични подхода за определяне на коефициентите на топлопроводността: апроксимациите на твърда сфера и 12-6 Ленард-Джоунс, които разглеждат различни взаимодействия между частиците. Коефициентите на топлопроводността k_1 и k_2 за твърда сфера и 12-6 Ленард-Джоунс апроксимациите са изразени както следва:

$$k_1 = 0.083264 \frac{T_g^{\frac{1}{2}}}{\mu^{\frac{1}{2}} \cdot d^2} \quad k_2 = 0.083264 \frac{T_g^{\frac{1}{2}}}{\mu^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma^2 \cdot \Omega_v \left(\frac{k_b T_g}{\epsilon_0} \right)}$$

$$\frac{1}{\Omega_v} = 0.697 \left[1 + 0.323 \ln \left(\frac{k_b T_g}{\epsilon_0} \right) \right]$$

1. Апроксимация твърда сфера

2. Апроксимация Ленард-Джоунс

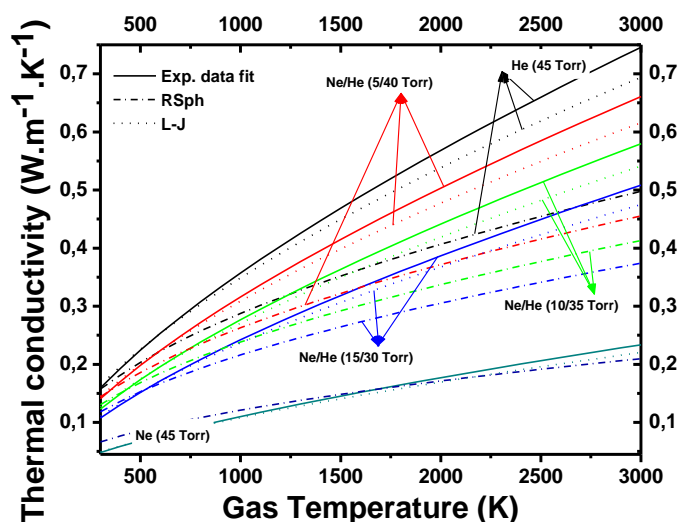
където μ е парциалната маса в аму, T_g е газовата температура в К, d е диаметъра на твърдите сфери (сума от атомните радиуси на взаимодействащите си частици) в Å, σ е междуатомната дистанция в Å, при която потенциалната енергия е нула, ϵ_0 е дълбочината на потенциалната яма, Ω_v е интеграла на ударите, който зависи от взаимодействащия потенциал.

Коефициентите на топлопроводност за бинарни газови системи са изчислени на базата на емпиричния метод на Брокау, за случай на газови разряди на He и с малки добавки на мед, бром и стронций.

Константите k_0 и m , от които зависи топлопроводността се получават чрез използването на експерименталните данни взети от [3]. Теплопроводност на He и Ne-He смес са представени в таблица 1.

Таблица 1. $k = k_0 \cdot T_g^m$ – топлопроводност

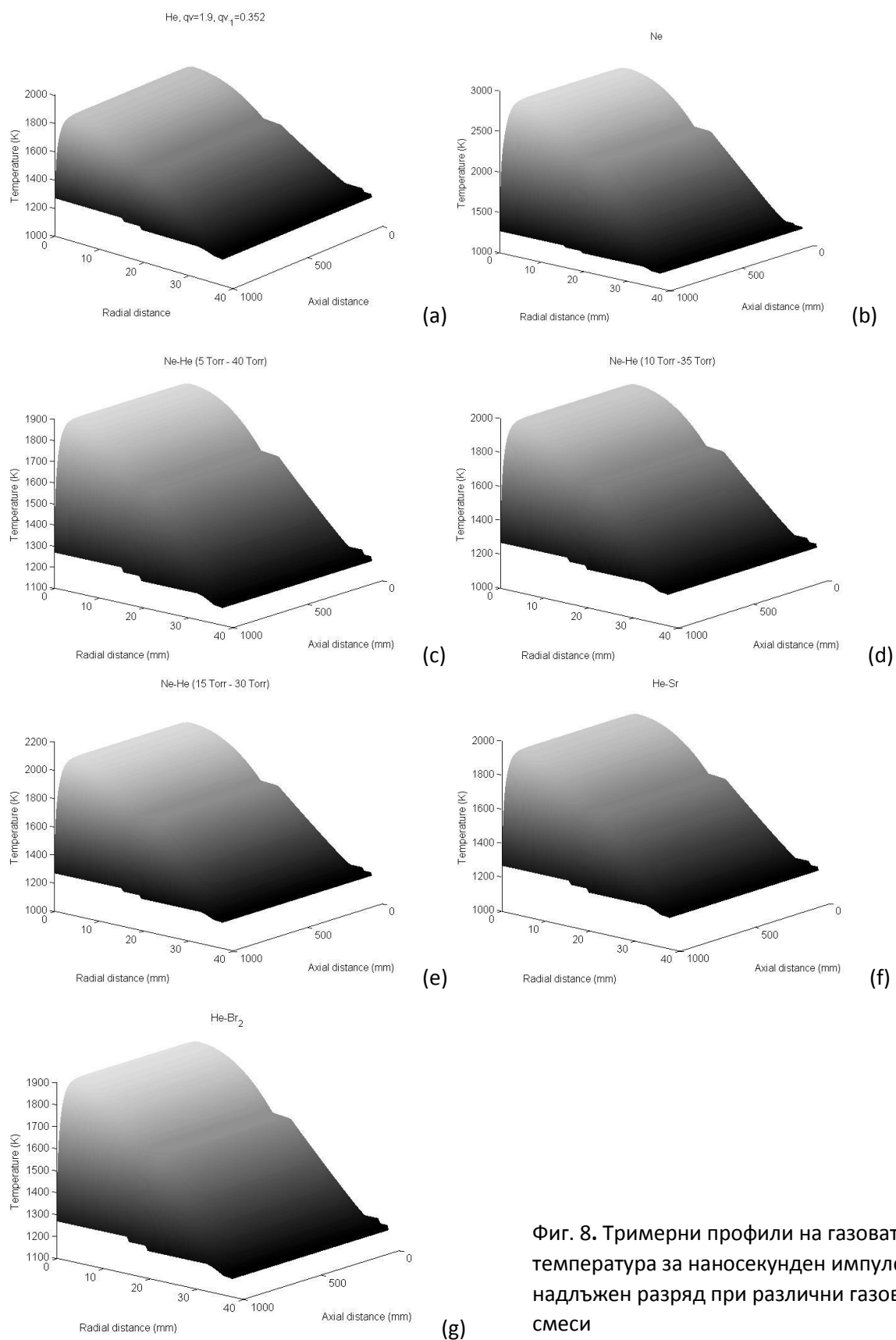
	He (45 Torr)	Ne (45 Torr)	Ne-He (5-40 Torr)	Ne-He (10-35 Torr)	Ne-He (15-30 Torr)	He-Sr	He-Br	Al ₂ O ₃	quartz
k_0	34.9×10^{-4}	9.7×10^{-4}	30.5×10^{-4}	26.4×10^{-4}	22.9×10^{-4}	26.8×10^{-4}	28.9×10^{-4}	44323.1	705.9×10^{-4}
m	0.670	0.685	0.672	0.673	0.675	0.680	0.675	-1.227	0.487



Фигура 7. Теплопроводност на He и Ne-He газова смес като функция на газовата температура

Радиално и аксиално разпределение на газовата температура

На Фиг. 8 е показано двуизмерно- температурното разпределение за наносекундни импулси в надлъжен разряд за газовете и газовите смеси и на He (2) ; Ne (b) ; Ne-He (c) , (d) и (e) и за He в смес от стронций Sr и бром Br. Парциалното налягане на Ne в смес от Ne-He е 5 Torr (a) ; 10 Torr (b) ; и 15 Torr (c), поддържайки общото налягане на сместа от Ne-He постоянно на 45 Torr, а налягането на стронция и брома е съответно 0.6 Torr и 1.2 Torr. Резултатът е представен в 2D (r, z) модел на разпределение на температурата на газа за наносекундни импулси в надлъжен разряд за различни смеси от газ при еднаква входна мощност.



Фиг. 8. Тримерни профили на газова температура за наносекунден импулсен надлъжен разряд при различни газови смеси

Разработването на 2D числен модел за определяне на газова температура при този газов разряд е по-нататъшна по-сложна стъпка при доближаването до реалността на

експерименталните условия за изучавания разряд. Резултатите показват че аналитичното решение намерено при предишни работи рефлектира достатъчно физическата реалност. Нова разрядна тръба с некомпактна изолация на активния обем от ZrO_2 е разработена за да се увеличи допълнително работната температура и нейното развитие продължава.

ГЛАВА 5 – 2D числено моделиране на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд He-SrBr₂ възбуден във високотемпературна разновидност на газоразрядната тръба

Резултатите описани в 4 глава показват, че оптималният температурен режим за лазерна генерация не е достигнат. Това вероятно се дължи на значителното намаление на плътността на мощността на източникът на топлина или нарастналото влияние на излъчването на керамичната тръба върху разпределението на газовата температура. Ето защо е създадена втора високотемпературна разновидност на първата газоразрядна тръба, описана в глава 4. Новата разрядна тръба с некомпактна изолация на активния обем от ZrO_2 е разработена, за да се увеличи допълнително работната температура и нейното развитие продължава.

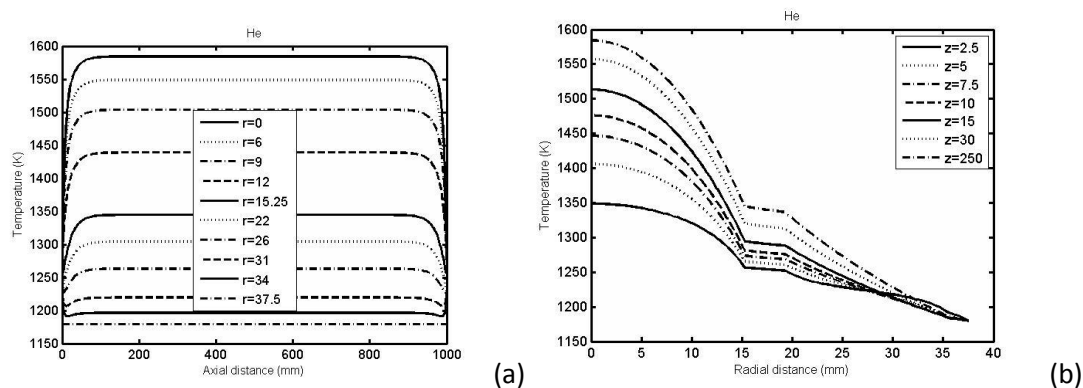
Коефициент на топлопроводност

Константите B и a са определени по описаните методи в глава 4. Резултатите са представени в таблицата. Теплопроводностите за бинарни газови системи са изчислени на базата на емпиричния метод на Brokaw [16] за газови разряди на He - Ne с малки добавки бром и стронций.

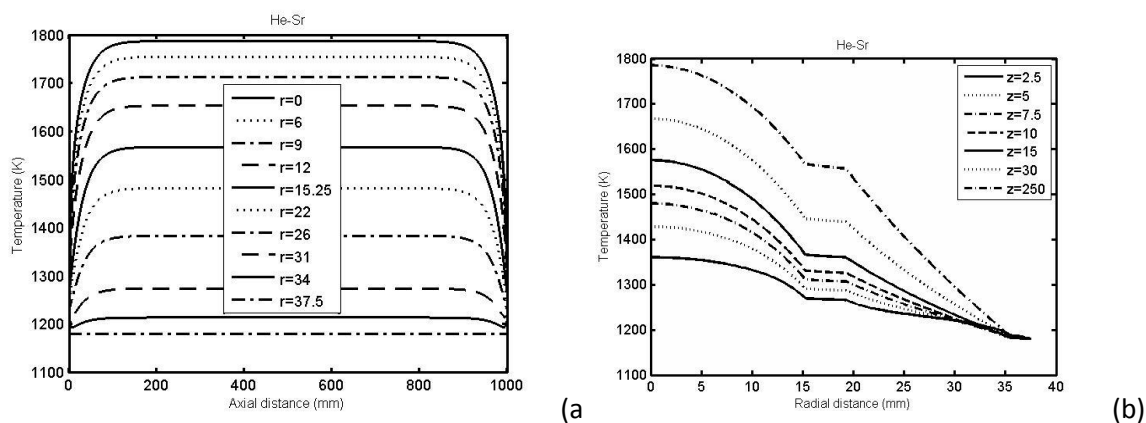
Таблица 2. $k = B \cdot T_g$ – топлопроводности в $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

	He	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	He-ZrO ₂	quartz
k_0	34.9×10^{-4}	44323.1	7326.2×10^{-4}	655.9×10^{-4}	705.9×10^{-4}
m	0.670	-1.227	0.130	0.366	0.487

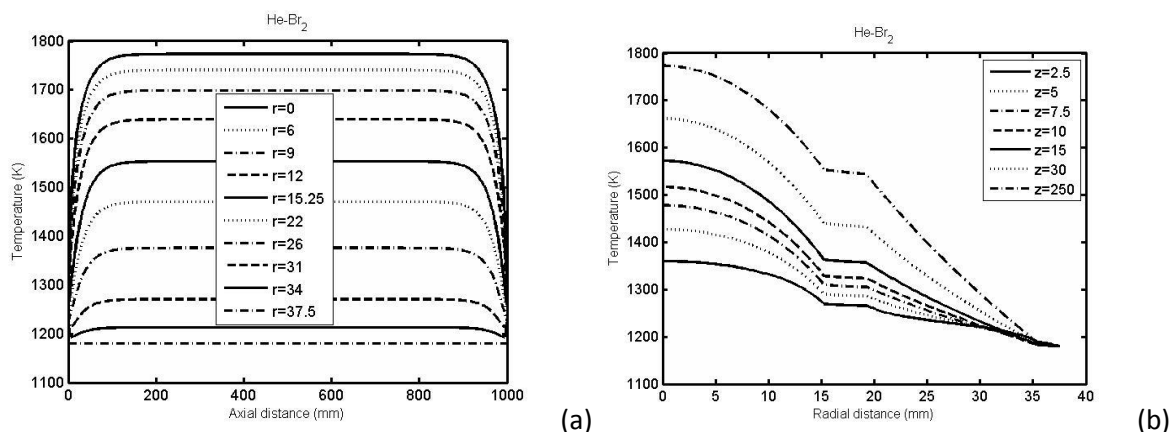
Радиално и аксиално разпределение на газвата температура



Фиг. 9 (а) и (б). Разпределението по оста (а) и радиуса (б) са показани за наносекунден импулсен надлъжен разряд при He (45 Torr).



Фиг. 10 (а) и (б). Разпределението по оста (а) и радиуса (б) са показани за наносекунден импулсен надлъжен разряд при смес Sr-He (0.6 Torr - 45 Torr).



Фиг. 11 (а) и (б). Разпределението по оста (а) и радиуса (б) са показани за наносекунден импулсен надлъжен разряд при смес Br-He (1.2 Torr - 45 Torr).

Новата конструкция на разрядната тръба с некомпактна изолация на активния обем е разработена за да се увеличи допълнително работната температура и експерименталните изследвания са в процес на развитие. Резултатите от численото моделиране 2D по (r, z) на газовата температура в наносекунден импулсен надлъжен разряд при различни смеси са представени за високообемни газови разряди на тръбата с нов дизайн. Това е нова стъпка към приближаване на реалността на експерименталните условия за изучавания разряд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компютърното моделиране на процесите и параметрите на газоразрядната плазма спомагат за пълното изследване на лазерите с пари на метали и метални халогениди, както и за обяснение на експериментално получените резултати. Създадени са редица самосъгласувани модели, които определят, както заселването на енергетичните нива на атомите и йоните, които участват в образуването на инверсна населеност, така и основните параметри на газоразрядната плазма.

Както беше споменато създаването и изследването на перспективни мощни лазери с пари на метали и метални халогениди с широк спектър на приложение среща редица трудности, както от технологично, така и от финансово естество. Това доведе до необходимостта от предварително компютърно моделиране на изследваните лазерни източници, имащо за цел определянето на оптималните газоразрядни условия преди да се създаде лазерния източник.

В настоящата дисертация са представени резултатите от теоретичното изследване на мощен стронциев лазер, генериращ в наносекунден импулсен надлъжен разряд He-(Ne)-SrBr₂ разряд, възбуждан в нова газоразрядна тръба с значително увеличен (над два пъти) активен обем. Създаден е 2D (r, z) числен модел за определяне на газовата температура в новата тръба. Това е следваща стъпка в развитието на теоретичните изследвания на лазерите, разработени от моите колеги. Проведените числени експерименти недвусмислено показват, че чрез добавянето на неон към буферния газ хелий, което се използва от много учени, се постига ефективно и лесно регулиране на газовата температура. Това дава възможност, освен да се влияе върху взаимодействието на тежки частици, което експлицитно зависи от газовата температура, да се контролира и управлява концентрацията на активните частици, което е много съществено за лазерите, работещи в режим на самонагряване. Така се отстранява един основен недостатък на тези лазери, а именно невъзможността да се оптимизират независимо входната електрическа мощност и концентрацията на активните частици.

Получените резултати от числения експеримент с първата изследвана тръба показват, че е необходимо да се създаде нова високотемпературна конструкция на газоразрядната тръба с частично запълване на свободната от разряд зона с изолация, като по този начин ще се увеличи значително газовата температура в активната зона. Това ще компенсира отсъствието на мощно високоволтно импулсно захранване. Добавянето на неон към буферния газ хелий може да се използва за допълнителна финна оптимизация на разрядните условия.

Предишни изследвания на моите колеги показват, че добавянето на неон към буферния газ хелий променя значително и електронната температура, което е много съществено за възбуждането с електронни удари на горните лазерни нива на стронциевия лазер. Ето защо е необходимо да се създаде 2D (r, t) числен модел за определяне на електронната температура в новите газоразрядни тръби чрез решаване на нестационарното уравнение на топлопроводността на електронния газ, което е един нов метод за нашия екип при определянето на електронната температура и представлява една бъдеща много перспективна задача.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Създаден е 2D числен модел за определяне на газовата температура в нова газоразрядна тръба за мощен стронциев атомен лазер, възбуждан с наносекунден импулсен надлъжен He-(Ne)-SrBr₂ разряд, със значително увеличен активен обем.
2. Създаден е 2D числен модел за определяне на газовата температура във високотемпературна разновидност на газоразрядната тръба с допълнителна термична изолация от циркониев диоксид на активната зона за мощен стронциев атомен лазер, възбуждан с наносекунден импулсен надлъжен He-(Ne)-SrBr₂ разряд.

Публикации по темата на дисертационния труд

Статии в реферирани списания:

1. Tatiana P. Chernogorova, Krassimir A. Temelkov, Nina K. Koleva, and Nikolay K. Vuchkov, *2D numerical modelling of gas temperature in large-volume Sr laser excited*

in nanosecond pulsed longitudinal He-SrBr₂ discharge, IEEE Transactions on Plasma Science, **41 (10)**, pp. 3043-3047, 2013. **IF = 1.174**

2. Tatiana P. Chernogorova, Krassimir A. Temelkov, Nina K. Koleva, Nikolay K. Vuchkov, *2D NUMERICAL MODELING OF GAS TEMPERATURE IN A NANOSECOND PULSED LONGITUDINAL He-SrBr₂ DISCHARGE EXCITED IN A HIGH-TEMPERATURE GAS-DISCHARGE TUBE FOR THE HIGH-POWER STRONTIUM LASER*, Comptes Rendus de l'Academie bulgare des Sciences, **67 (2)**, pp. 197-202, 2014. **IF= 0.210**
3. T. P. Chernogorova, K. A. Temelkov, N. K. Koleva, N. K. Vuchkov, *2D numerical modeling of gas temperature in large-volume high-temperature nanosecond pulsed longitudinal discharge in helium with small admixtures of neon, strontium and bromine*, Journal of Physics: Conference Series, **356**, art. No. 012012, 2012.
4. T. P. Chernogorova, K. A. Temelkov, N. K. Koleva, N. K. Vuchkov, *2D numerical modelling of the gas temperature in a high-temperature high-power strontium atom laser excited by nanosecond pulsed longitudinal discharge in a He-SrBr₂ mixture*, Journal of Physics: Conference Series, **514**, art. No. 012060, 2014.

Доклади на научни форуми

1. T. P. Chernogorova, K. A. Temelkov, N. K. Koleva, N. K. Vuchkov, "2D numerical modeling of gas temperature in large-volume high-temperature nanosecond pulsed longitudinal discharge in helium with small admixtures of neon, strontium and bromine", poster-report and in Abstracts of 17th International Summer School on VEIT, Sunny Beach, Bulgaria, 19 – 23 September, 2011.
2. T. P. Chernogorova, K. A. Temelkov, N. K. Koleva, N. K. Vuchkov, "2D MODEL OF GAS TEMPERATURE IN A NANOSECOND PULSED LONGITUDINAL He-SrBr₂ DISCHARGE EXCITED IN A HIGH-TEMPERATURE GAS-DISCHARGE TUBE NEWLY DEVELOPED FOR THE HIGH-POWER STROTIUM ATOM LASER", poster-report and in Abstracts of 18th International Summer School on VEIT, Sozopol, Bulgaria, 7 – 11 October, 2013.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. M. Peavy, L. Reinisch, G. T. Rayne, and V. Venugopalan, "Comparison of cortical bone ablations by using infrared laser wavelength 2.9 to 9.2 μm ", *Laser in Surgery & Medicine*, No. 25, pp. 421-434, 1999.
2. J. M. Aurhammer, 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", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, vol. 68, pp. 111-119, 1999.
3. M. A. Mackanos, D. Simanovskii, K. M. Joos, H. A. Schwettman and E. D. Jansen, "Mid Infrared Optical Parametric (OPO) as a Viable Alternative to Tissue Ablation With the Free Electron Laser (FEL)", *Laser in Surgery & Medicine*, art. 20461, pp. 1-7, 2007.
4. A. V. Platonov, A. N. Soldatov, and A. G. Filonov, "Pulsed Strontium Vapor Laser", *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 8, pp. 120-121, 1978.
5. A. N. Soldatov, A. G. Filonov, A. S. Shumeiko, A. E. Kirilov, B. Ivanov, R. Haglund, M. Mendenhall, B. Gabella, and I. Kostadinov, "A Sealed-Off Strontium Vapor Laser", in *Proc. of SPIE*, vol. 5483, pp. 252-261, 2004.
6. B. L. Pan, Z. X. Yao, and G. Chen, "A Discharge –Excited SrBr_2 Vapour Laser", *Chin. Phys. Lett.*, vol. 19, No. 7, pp. 941-943, 2002.
7. 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_2 discharge", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 3769-3772, 2006.
8. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, B. Mao, E. P. Atanassov, L. Lyutov, and N. V. Sabotinov, "High-Power Sr Atom Laser Excited in Nanosecond Pulsed Longitudinal He- SrBr_2 Discharge", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 45, No. 3, pp. 278-281, 2009.
9. K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, I. Freijo-Martin, A. Lema, L. Lyutov and N. V. Sabotinov, "Experimental study on the spectral and spatial characteristics of a high-power He- SrBr_2 laser", *Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, art. 115105, (6 pages), 2009.
10. K. A. Temelkov, S. I. Slaveeva, N. K. Vuchkov, "Analytical calculation of gas temperature and experimental determination of electron temperature in gas discharge in Ne-He mixtures", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, No. 3, pp. 831-835, 2011.
11. S. I. Slaveeva, K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, "A study on plasma parameters of He and Ne-He nanosecond pulsed longitudinal discharge for high-temperature large-volume tube", *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences*, vol. 65, No. 8, pp. 1043-1048, 2012.
12. S. I. Slaveeva "ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОСНОВНИТЕ ГАЗОРАЗРЯДНИ ПАРАМЕТРИ НА МОЩЕН He- SrBr_2 ЛАЗЕР", PhD Thesis, Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, 2013.