

## РЕЦЕНЗИЯ

на

**на дисертационен труд, представен за получаване на образователната и научна степен „доктор”**

**Автор на дисертационния труд:** Димитър Васков Фиданов

**Тема на дисертационния труд:** „Математическо моделиране на лазери с метални пàри”

**Заявител за откриване на процедурата:** катедра „Математически анализ“, Факултет по математика и информатика, ПУ „Паисий Хилендарски”

**Докторска програма:** Математическо моделиране и приложение на математиката

**Рецензент:** проф. д-р Михаил Д. Тодоров, кат. Математическо моделиране и числени методи, ФПМИ, ТУ – София, зап.РЗЗ-1433/26.04.2021 г. на Ректора на ПУ „Паисий Хилендарски”

### **Кратки биографични данни за дисертанта**

Димитър Васков Фиданов е роден през 1979 г. Завършва Търговска гимназия в Пловдив през 1998 г. В периода 1999-2008 г. следва в ПУ „Паисий Хилендарски”, където последователно се дипломира като бакалавър по икономика (2003 г.) и бакалавър по социология. През 2007-08 г. следва и завършва магистратура по икономика в Аграрен университет – Пловдив. През 2016 г. става бакалавър по физика и математика в ПУ. В същия период е учител по математика, физика и астрономия в гр. Садово. От 2017 г. и досега е хоноруван асистент по математика в ПУ. През същата година е зачислен в редовна докторантура в ФМИ към ПУ.

Представената дисертация има обем от 131 стр., формат А4, в.т.ч. 26 фигури, 24 таблици и библиография от 146 работи.

### **1. Актуалност на дисертационния труд**

Макар че основните типове лазери са полупроводникови и твърдотелни, лазерите с метални пàри (ЛМП) продължават да бъдат актуални поради техните уникални свойства – висока кохерентност и сходимост на лазерния лъч, компактност, ниска цена, лесна поддръжка, дълъг срок на експлоатация и др. Независимо, че лазерите с пàри на чиста мед и нейните съединения се смятат за

добре изучени, теоретичните и експериментални изследвания за този тип лазери продължават. Ново направление са приложения в медицината: безкръвна хирургия за аблация на кости и тъкани без увреждания. Това се дължи на уникалните свойства на лазерния източник и лазерния лъч. Прилагането на математически модели е допълнителен инструмент за изследване, компютърни симулации, които могат да имат насочващ характер за експеримента, както и за откриване на съществени свойства на явления и процеси и др. Отчитайки спецификата и многообразието на физичните процеси и участващите емпирични параметри, методите на математическото моделиране, прилагани за ЛМП, могат да се разделят на няколко категории: кинетични, флуидни, симулационни, статистически.

### **1.1. Кинетични модели на ЛМП**

За ЛМП кинетичните модели са базирани основно на уравнения. Тук могат да се включат уравнения за разпределението на електроните по енергии от кинетичното уравнение на Болцман, уравнения на потенциала и интензитета на електричното поле, хидродинамични уравнения на енергията на електроните, разпределение на температурата, уравнение на енергетичния баланс и други. Кинетичните модели се решават с числени методи и позволяват провеждане на симулации за изучаване и анализиране поведението на процесите при задаване на конкретни работни характеристики на устройството и определяне на гранични и/или начални условия към моделните уравнения. Недостатък на кинетичните модели е, че изследователят сам избира и задава уравненията и зависимостите, които го интересуват. По този начин е възможно да бъдат пропуснати важни и дори неизвестни компоненти и процеси на средата. Също така трудно се получава реалният количествен израз на относителното тегло на отделните величини в цялостния изследван процес.

### **1.2. Статистически модели на ЛМП**

С помощта на статистически методи се разкриват класификации, връзки и зависимости, които не могат да се получат с друг тип моделиране или експерименти. Статистическата обработка на данните допълва и разширява изследователските резултати и познание. Тя дава възможности и за предсказване на експеримента. Има множество параметрични методи и модели на характеристики на ЛМП и предсказване на експеримента. Тук попадат класически многомерен анализ за моделиране на данни за ЛМП, с чиято помощ са построени параметрични регресионни модели на изходната електрическа мощност (лазерна генерация). Освен линейни регресионни модели с факторните променливи са построени и нелинейни. По подобен начин са проведени факторен анализ и регресия с факторите за моделиране и предсказване на друга изходна характеристика – лазерната ефективност на CuBr лазер. Клъстерен анализ, факторен анализ и регресия с фактори са използваните техники за моделиране на променливата на третата основна изходна характеристика на ЛМП – животът на служба. Разработен е полиномен регресионен модел от втора степен за определяне на изходната генерация на лазер с пари на меден бромид в зависимост от 10 независими входни характеристики на лазера.

### **1.3. Интелигентни методи с машинно обучение**

Необходими са поради сложните взаимовръзки в експерименталните данни за ЛМП. Многомерните регресионни адаптивни сплайни (МАРС) се използват за статистическо моделиране на данни от ЛМП. Моделира се лазерната генерация на UV лазери. Използват се данни за лазерната генерация и независими величини от голям брой експерименти. Построени са линейни МАРС модели, както и от втора и от трета степен. С помощта на МАРС метода са намерени както локални линейни, така и нелинейни адекватни зависимости. Определена е степента на влияние на входните променливи върху изходната лазерна мощност. Демонстрирано е предсказване на експеримента с построените модели.

От казаното дотук става ясно защо именно този тип лазери продължават активно да се разработват. Това е и мотивацията за разработката на настоящата дисертация. Тя е подплатена от нуждата за целта математическа квалификация и експериментални знания, които дисертантът несъмнено притежава.

### **2. Анализ на състоянието на проблема**

От направения обстоен литературен обзор както на експерименталната част, така и на съществуващите математически модели се вижда, че в научно-приложен аспект съществуват редица актуални задачи за по-нататъшното развитие на лазерите с метални пàри. По отношение на математическото моделиране на процесите е необходимо да се формулират и решават задачи, свързани с електронната и газова температура и статистическата обработка на експериментални данни за ЛМП. Доколкото лазерни устройства от този тип са създадени от руски учени и дисертантът има достъп до резултати и данни, въпросът се свежда до получаване на нови зависимости за някои основни енергетични и термични процеси в ЛМП с помощта на аналитични и статистически методи на моделиране, което е и основна цел на дисертационния труд. Несъмнено темата на настоящия дисертационния труд е актуална.

### **3. Методика на изследванията**

В дисертационния труд са използвани следните основни методи: факторен анализ, многомерна полиномна регресия, методът на случайните гори.

Факторният анализ е статистическа техника, която се прилага при наличие на множество от корелиращи променливи за групирането им в ново множество с некорелиращи изкуствени променливи, наречени фактори. Като резултат факторните променливи се очаква да не корелират или да корелират слабо. Тъй като при тази процедура обикновено се губи част от информацията, то се търси такова определяне на фактори и брой фактори, които обясняват възможно по-голяма част от общата вариация на изходните данни.

Многомерният регресионен анализ е един от най-мощните и често използвани статистически анализи за описание на причинно-следствена количествена зависимост между няколко независими променливи (предиктори или регресори) и една зависима от тях променлива. Определянето на коефициентите на регресия става по добре известния метод на най-малките квадрати.

Методът на случайните гори (Random forest) е мощен статистически дейта майнинг метод с машинно обучение от типа на ансамбловите разрешаващи дървета. Счита се, че използването на ансамбъл (множество) от „слаби“ класификационни дървета, всяко с невисоко качество на предсказването след усредняването от всички тях ще доведе до добър краен резултат на предсказване. Приложим е за решаване на задачи за класификация и регресия на данни с извадки с произволна дължина, с числови и/или номинални променливи. Няма ограничения и изисквания за типа на разпределението на променливите.

Методиката е подчинена на основните задачи и начините за тяхното решаване, а именно аналитично-числено моделиране на електронната температура (енергията на електроните) в разряда на ЛМП; създаване на нови аналитични модели за определяне на температурния профил на основния инертен газ в ЛМП; установяване на пределните възможности за функциониране на лазера от гледна точка на термойонизационната стабилност на разряда. Използван е специализиран софтуер: Wolfram Mathematica, SPSS IBM Statistics, Salford Predictive Modeler (SPM).

#### **4. Характеристика и оценка на получените резултати**

Във въведението (Глава 1) е направен обстоен преглед и критичен анализ на достиженията, на постигнатите резултати, както и на нерешените проблеми. По този начин са ясно очертани насоките на изследванията, проведени от дисертанта и представени в настоящата дисертация. Те се свеждат до 3 основни задачи, резултатите и изводите от чието решаване ще бъдат разгледани по-долу.

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. 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. Разработен е опростен аналитичен модел за определяне на електронната температура на разряда, основан на едномерното стационарно уравнение на Поасон и гранични условия от първи и втори род. Предложеният модел позволява да се изчисли радиалното разпределение на електронната температура на разряда, като се вземе предвид радиалното разпределение на подадената електрическа мощност.

За реално съществуващ лазерен източник е проведено компютърно изследване на температурния профил на активната среда, т.е. работния газ (газова смес, която осигурява протичането на процеса) в лазери с пари на медта и нейните съединения и е съставен компютърен модел, който позволява за първи път да се определи радиалния профил на температурата на газа в напречното сечение на лазерната тръба. Предложената методика позволява да се извършва планиране на експеримента и разработване на нови лазерни източници.

Развита е методика, която позволява да се определи максимално възможната подавана електрическа мощност в газовия разряд и максималната енергия на електроните от позициите на термойонизационната и електройонизационна устойчивост на газовия разряд. Методиката се основава на решаване на двумерното квазистационарно уравнение на топлопроводност в напречното сечение на газовата тръба за моделиране на температурата на неутралния газ и електронната температура на разряда.

В Глава 3 въз основа на данните от експериментите и използването на средствата на многомерния статистически анализ като факторен анализ и множествена линейна регресия са разработени три вида емпирични модели:

- Получена е класификацията на основните лазерни характеристики в 3 фактора и е показано, че най-силно влияние върху изходната лазерна мощност оказва променливата  $НВг$ ;
- Разработен е линеен регресионен модел с помощта на факторните променливи от факторния анализ. Моделът обяснява данните с коефициент на детерминация 76.3%;
- Построен е и е изследван нелинеен полиномен модел от втора степен, основан на множествен регресионен анализ. Моделът изследва зависимостта на изходната лазерна мощност от 27 независими променливи и една константа. Постигнато е съвпадение с данните от 93%.

Получените регресионни уравнения са сравнени с експерименталните данни. Освен това е направено сравнение на предсказванията на полиномния модел от втора степен с известни от литературата числени резултати от симулации за същите данни. Потвърдена е значимостта на бромоводородните добавки (променлива  $НВг$ ) като основна работна лазерна характеристика за определяне и повишаване на изходната лазерна мощност от трите построени модела. Определен е приносът на влияние на отделните променливи върху  $Plas$  (изходна лазерна генерация) в комплекса от променливи. Дисертантът отбелязва, че с кинетични модел такава оценка не може да се получи.

В Глава 4 е проведено статистическо моделиране на емпирични данни от 465 експеримента за ЛМП, подбрани от различни литературни източници. Всеки експеримент е описан с изходната мощност  $P_{out}$  и 12 работни характеристики. 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 показват, че разпределенията на всички променливи са твърде различни от нормалното разпределение. Чрез корелационен анализ със Спирмън  $R_o$  коефициенти е установено, че съществуват високи статистически значими корелационни зависимости между тях. 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 е избран методът на Случайните гори (RF), който не се влияе от такива характеристики на данните.

Построени са 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 CuVr лазери в литературата.

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%). 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, усиването и други изходни характеристики, при наличие на данни от наблюдения.

Резултатите от Глави 3 и 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.

## **5. Преценка на авторската справка**

Авторската справка отразява приносите и акцентите в дисертацията като цяло. Приносите имат научен, но в много по-голяма степен научно-приложен характер. Проведените симулации, представените анализи и изводи могат да се използват успешно в реални условия. Оценявам приносите като колективни, но с водеща роля на дисертанта и под ръководството на научния ръководител. Всички те могат да бъдат причислени към направлението „Обогатяване на съществуващи знания”.

## 6. Критични бележки по трудовете и литературна осведоменост на дисертанта

Дисертацията прави впечатление на задълбочено и обстойно изследване. Извършен е огромен обем от работа. Според мен тя може да послужи като допълващ източник на информация за практическа реализация на лазерни устройства. Написана е на правилен български език, изложението е логически последователно. Нямам критични бележки по същество. Налице е и задълбочено познаване на литературата по разглежданите в дисертацията въпроси, видно от библиографския списък, което прави получените резултати още по-убедителни. Литературната осведоменост на дисертанта се основава на най-нови източници.

## 7. Публикации по дисертацията

Резултатите са докладвани на няколко конференции и семинари. Публикувани са в рецензирани сборници на AIP и IOP, както и в *Optical and Quantum Electronics* (IF=1.842, Q3). Една статия е самостоятелна, други 3 са в съавторство с научния ръководител на дисертанта и 2 с двама съавтори. AIP CP има SJR=0.182 (2020), за IOP Conference Series: Materials Science and Engineering не открит данни за SJR.

Други данни за публикациите могат да се видят в представената таблица.

**Таблица:** Справка за трудовете

Статии – 6 бр.	У нас - 1 бр. <i>ESGI</i> В чужбина - 5 бр. <i>AIP CP, IOP, Optical and Quantum Electronics</i> (IF=1.842, Q3)
Доклади на национални и международни научни прояви – 6 бр.	У нас - 6 бр. (Конференции на ТУ-филиал Пловдив, AMiTaNS'19)
Участие в изследователски проекти	У нас – 3 бр. (ФНИ на ПУ)

## 8. Приложение на резултатите в практиката

Получените в дисертацията резултати имат приносен характер към експерименталната и статистическа физика. Наред с теоретичните от съществена важност са обаче научно-приложните приноси, тъй като тук се работи с масиви от реална входяща информация, която след съответна статистическо моделиране – числено и аналитично и интелигентен анализ на получените резултати извежда информация, която има адекватен характер. Според мен на базата на проведените изследвания може да се говори за създадена технология, която може да се използва и да работи ефективно в реални условия при конструирането на лазерни устройства. Нейната понататъшна успешна реализация е и пожеланието ми към дисертанта и неговия научен ръководител.

## **9. Преценка на автореферата**

Авторефератът отразява правилно и пълно съдържанието на дисертационния труд.

## **10. Лични впечатления**

Познавам дисертанта. Имах възможността да слушам неговата презентация по тематиката на дисертацията на конференцията AMiTaNS'19 в Албена. Впечатленията ми са, че е деен и инициативен млад човек с перспектива за развитие и научно израстване, което е гаранция, че ще приложи успешно натрупаните знания и резултати в по-нататъшното си кариерно развитие.

## **Заклучение**

Отчитайки значимостта и обема на проведените изследвания и след справка с ППЗРАСРБ в ПУ, както и със специфичните изисквания на ФМИ мога да твърдя, че представената дисертация отговаря напълно и количествено, и качествено на препоръчителните наукометрични критерии на ПУ за присъждане на научни степени. Въз основа на гореизложеното си позволявам да препоръчам убедено на членовете на уважаемото НЖ да гласуват даване на ОНС „доктор” на Димитър Васков Фиданов, Професионално направление 4.5. Математика, докторска програма „Математическо моделиране и приложение на математиката”.

## **СЪСТАВИЛ:**

Проф. д-р Михаил Тодоров  
кат. „Матем. моделиране и числени методи”,  
ФПМИ при ТУ - София

30 май 2021 г.  
София