

РЕЦЕНЗИЯ

от члена на НЖ проф. дфн Иван Желязков
на дисертационния труд на тема
**Моделиране и експериментално изследване на
неравновесна плазма**
на ас. Пламена Атанасова Маринова
за присъждане на образователната и научна степен *доктор*

1. Биографични данни. Ас. Пламена Маринова е родена на 15.09.1988 г. в гр. Русе. Средното си образование получава през 2007 г. в Математическата гимназия “Баба Тонка”, гр. Русе, като основните предмети са математика, информатика и английски език. В периода 2007–2011 година е студент по физика във Физическия факултет на СУ “Св. Климент Охридски”. Дипломира се като бакалавър по физика, а темата на дипломната ѝ работа е “Микровълнови факли и микровълнови разряди при атмосферно налягане”. От 2012 до 2014 година е студент по Магистърската програма “Термоядрен синтез и плазмени технологии” и получава образователната степен магистър по физика. От 2014 до 2017 година е докторант към Физическия факултет на СУ “Св. Климент Охридски”, като темата на дисертационния ѝ труд е “Моделиране и експериментално изследване на неравновесна плазма”. От м. юни 2011 година до м. март 2018 година работи като програмист към Департамента за езиково обучение на СУ “Св. Климент Охридски”, а също така и като хоноруван преподавател по физика и на курс по Начална компютърна грамотност. От м. март 2018 г. досега е асистент в Лесотехническият университет в София.

2. Актуалност на проблема. Високочестотните и микровълновите разряди заемат важно място във физиката на плазмата и газоразрядните технологии през последните 4–5 десетилетия. Специален интерес представляват микровълновите разряди, създавани и поддържани от бягащи електромагнитни вълни. Наред с интересната физика и предизвикателствата, свързани с тяхното моделиране, този тип разряди намират широко приложение в плазмените технологии (в това число и в нанотехнологиите, получаването на графен), в метрологията, при получаването на нови ефективни източници на светлина, в медицината, при конструирането на плазмени антени и др. Неравновесните микровълнови разряди, изследвани главно експериментално, откриват нова страница в областта на газоразрядната физика. Тяхното моделиране е едно предизвикателство и затова проблемът на дисертационния труд на ас. Пламена Маринова – Моделиране и експериментално изследване на неравновесна плазма – безспорно е актуален. Едно по-адекватно заглавие на дисертационния труд би било “Моделиране и експериментално изследване на неравновесна микровълнова плазма”.

3. Съдържание и структура на дисертационния труд. Дисертацията на Пламена Маринова е по научната специалност *Физика на плазмата и газовия разряд* (шифър 01.03.16) от направление 4.1. *Физически науки* и отразява научните постижения на дисертанта при теоретичното моделиране на 2 вида микровълнови разряда при атмосферно налягане в две конфигурации [плазма в диелектрична тръба (фиг. 2.3д) и плазмен факел в отвореното пространство (фиг. 2.3г)] плюс експериментално изследване на аргонов плазмен факел с течности, както и на

бактерицидният ефект при пряко плазмено третиране на монобиофилми от микроорганизми (*Pseudomonas sp. AP-9* и *Brevibacillus laterosporus BT-271*).

Дисертационният труд се състои от 5 глави, заключение, основни приноси, списък на публикациите по дисертацията, библиография и две приложения. Той (дисертационният труд) съдържа 145 страници, 101 фигури, 3 таблици и са цитирани 92 източника. Броят на публикациите, върху които е написан дисертационният труд, е 11: две публикувани статии в списание с импакт фактор (*J. Phys. D: Appl. Phys.*), трета статия, предложена за публикуване в *J. Phys. D: J. Appl. Phys.*, четвърта е публикувана в *J. Phys.: Conf. Series*, пета в *Int. J. Agric. Innov. Res.* и 6 доклада от конференции, публикувани в пълен текст. Всички публикации са в съавторство, като в пет от съвместните работи Маринова е пръв автор, в 2 е на второ място, в една на трето място, в две на четвърто и в една – на седмо място; това ми позволява да заключа, че дисертантът е бил равностоен съавтор в съвместните публикации. Докладите са публикувани в материалите на редица международни научни форуми: на X International Workshop MICROWAVE DISCHARGES: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS 2018 (2 публикации), на International Symposium on Plasma Chemistry 2015 (1 публикация), на 32nd ICPIG 2015 (1 публикация), на IX International Workshop on MICROWAVE DISCHARGES: Fundamentals and Applications (1 публикация), и на 31st ICPIG 2013 (1 публикация).

Уводната глава в обем от 13 страници включва основните характеристики на нискотемпературната микровълнова плазма и плазмените технологии, в унисон с формулираните в доклада на Department of Energy Office of Fusion Energy Sciences, представен на Workshop on Low Temperature Plasma, състоял се през м. септември 2008 година, задачи/въпроси. Става дума за изискванията към източниците на студена плазма, а именно да бъдат малки, евтини и да осигуряват високи концентрации на заредените частици. Важни условия за плазменото третиране на живи организми са плазменият източник да работи в отворено пространство, т.е. при атмосферно налягане и ниска газова температура.

Втората глава е посветена на физиката на повърхнинновълновите разряди, създавани и поддържани от бягащи на интерфейса плазма–диелектрик (в цилиндрична геометрия) електромагнитни вълни (фиг. 2.2). Източници на електромагнитните вълни са сърфатрон, сърфагайд или Ро-бох, чиито конструкции и принцип на действие са подробно изложени в статии на Moisan и Zakrzewski. Необходимо е да се отбележи, че съществува разминаване/несъответствие между означенията на подфигурите във фиг. 2.3 и обясненията в текста, а именно: при провеждане на експерименталните изследвания докторантът е използвал две конфигурации: (1) плазма в диелектрична тръба фиг. 2.3д и (2) плазмен факел в отворено пространство фиг. 2.3г. И в двата случая на снимките над въпросните две подфигури ясно се вижда създаваният плазмен факел при атмосферно налягане.

В подглава 2.2 са подробно обсъждани различните приложения на получаваната неравновесна плазма за биологични и екологични приложения. Съществен принос в дисертационния труд е прецизният обзор на моделирането на неравновесна плазма (подглава 2.3). Стартирайки с пионерната работа на Trivelpiece и Gould, ас. Маринова проследява теоретичните и експериментални изследвания на сърфатронна плазма, провеждани от различни научни колективи в Софийския университет, в Парижкия университет-юг (Франция), в Университета в Монреал (Канада), в Техническия университет в Лисабон (Португалия), Университета в Кордоба (Испания), в Рурския университет в Бохум (Германия), в Кайрския университет в Гиза (Египет), във Федералния университет във Флориано-

полис (Бразилия), в Техническият университет в Айнховен (Нидерландия) и др. Тук става дума за основополагащите експериментални и теоретични работи на Zakrzewski *et al.*, Glaude *et al.*, Ferreira *et al.*, Mateev *et al.*, Zhelyazkov *et al.*, Boisse-Laporte *et al.*, Benova *et al.*, Kortzhagen *et al.*, Sá *et al.*, Aliev *et al.*, Zhang *et al.*, Georgieva *et al.*, което обстоятелство ми позволява да заключа, че дисертантът познава добре и в детайли съвременното състояние на моделирането на сърфатронна плазма. Наред с това са обсъдени различните типове модели (термодинамични, флуидни, ударно-радиационни, кинетични, компютърни симулации и самосъгласувани модели) като фокусът е най-вече върху самосъгласуваните модели. Що се отнася до компютърните симулации, ас. Маринова коментира симулациите от типа PIC, PIC-MCC, а също така и платформата PLASIMO, използвана от Manuel Diaz и Emilio Carbone за описание на повърхнинновълнова плазма в аргон при високо и междинно налягане.

В 2.3.3 е изложен подходът към изграждането на самосъгласувания модел, а именно че той се състои от две основни части: (1) електродинамично описание на разпространението на електромагнитната вълна и (2) модел на газовия разряд, който при различните автори е флуиден, или кинетичен, и от който се получават честотата на удари с предаване на импулс v и средната енергия за създаване на двойка електрон–йон θ . Достатъчно подробно и компетентно е обсъден първият самосъгласуван радиален модел на Carlos Ferreira от 1981 г., както и кинетичния модел (включващ уравнението на Болцман, уравненията за баланса на частиците и уравненията на Максвел за разпространението на вълната при ниско и междинно налягане, решавани при подходящи гранични условия) на Цветелина Петрова и Евгения Бенова от 1999 година. Резултатите от този модел, получени при фиксирана стойност на отношението v/ω , което не се променя по дължината на плазмения стълб. Този модел е използван от Мариана Атанасова за изследване на аргонов плазмен стълб при атмосферно налягане – резултатите за аксиалното и радиалното разпределение на компонентите на електромагнитната вълна при различни честоти на удари за две газоразрядни конфигурации (плазма–вакуум и плазма–диелектрик–вакуум) са илюстрирани на фиг. 2.26. Моделът позволява да се изследва ФРЕЕ при различни електронни концентрации при газова температура 1000 К (фиг. 2.27), както и зависимостта на температурата на електроните при различни концентрации за 8 газове температури (2.28). С това фактически приключва уводът към дисертационния труд на ас. Пламена Маринова.

В глава трета (съществената част на дисертационния труд) последователно се изгражда самосъгласуваният модел. Електродинамичната част на модела е стандартна: газоразрядната плазма се третира като диелектрик с комплексна диелектрична проницаемост, която е функция на отношението v/ω . От уравненията на Максвел при подходящи гранични условия се получава локалният дисперсионен закон, в който ъгловата честота ω е реална константа, а вълновото число k е комплексно. От локалният дисперсионен закон дисертантът получава числено две криви: т. нар. фазова диаграма (фиг. 3.1б), в която ω/ω_p се представя като функция на нормираното реално вълново число kR . При стойности на $v/\omega > 1$ във фазовата диаграма се наблюдава точка на обръщане, която според Michel Moisan е край на стълба. От друга страна зависимостта на ω/ω_p от комплексното вълново число $(k_r + k_i)R$ дава дисперсионната крива на електромагнитната вълна (фиг. 3.1в) и именно нейната пресечна точка със съответната фазова диаграма (т.е. за една и съща стойност на v/ω) съгласно дисертантът е действителният край на стълба. Това е

едно важно уточнение. Необходима е малка корекция на надписа към фиг. 3.1б: $k'R$ и $k''R$ трябва да станат съответно k_rR и k_iR . В електродинамичната част се получава и уравнение за баланса на енергията на вълната, от което се пресмята абсорбираната от вълната мощност Q [ур. (3.16)].

Кинетичната част на модела разглежда аргонова плазма като отчита наличието на аргонов атом в основно и възбудено състояние, аргонов димер, атомни и молекулни аргонови йони и електрони. Поради това тя се разделя на две части: (1) кинетика на електроните и (2) кинетика на тежките частици на аргоновата плазма. В 3.2.1 е представена схемата на енергетичните нива, състояща се от 9 блока. Включените в модела процеси (при атмосферно налягане) са представени в Таблица 1, а използваните сечения и константи са изброени в ПРИЛОЖЕНИЕ 1 на дисертационния труд. Чрез решаване на уравнението на Болцман числено се пресмята ФРЕЕ (фиг. 3.3), както и скоростните константи на процесите и ефективната честота на удари ν_{eff} . Необходимо е да отбележим, че ФРЕЕ не е Максвелова. Балансът на енергията на електроните дава средната мощност за създаване на електрон–йонна двойка в разряда θ [ур. (3.21)]. Тази мощност участва в самосъгласуваната връзка между кинетиката и електродинамиката. Самото балансно уравнение за електроните е ур. (3.22). Самосъгласуваността между електродинамиката и кинетиката се осъществява с две процедури: (1) абсорбираната от електроните вълнова мощност се приравнява на (2) изразходваната мощност за осъществяване на елементарните процеси в разрядния обем (фиг. 3.4). Стойностите на θ , и на диелектричната проницаемост на плазмата ϵ_p , зависеща от честотата на удари електрон–неутрал с предаване на импулс ν_{eff} , са представени съответно с уравнения (3.24), (3.26) и (3.27).

Числените резултати от моделирането са представени в четвърта глава. Изследвано е как кинетиката (с конкретна ФРЕЕ във всяка точка по дължината на стълба) се изменя заедно с плазмената плътност в аксиално направление. В 4.2 се дава зависимостта на ν_{eff} от концентрацията на електроните n_e при фиксирана честота $\omega/2\pi = 2.45 \text{ GHz}$ и $R_{\text{in}} = 1 \text{ mm}$, $R_{\text{out}} = 3.5 \text{ mm}$ (фиг. 4.11). На фиг. 4.12 са представени фазовите диаграми при три различни стойности на ν , както и диаграмите на комплексния коефициент на затихване на вълната. Аксиалните профили на плазмената плътност при същите условия са илюстрирани на фиг. 4.13, от която се вижда, че n_e силно зависи от ν при фиксирани газоразрядни условия. На фиг. 4.14 са представени аксиалните профили на вълновата мощност за трите случая, от които се заключава, че при фиксирани високи честоти на удари е нужна значително по-голяма вълнова мощност отколкото онази, която е необходима за поддържане на плазмения стълб при $\nu = \nu(n_e)$ (плазма, заобиколена от вакуум). Влиянието на заобикалящата плазмена среда върху вълновите и плазмените характеристики на разряда за трите случая на вакуум, диелектрик и вода е графично изобразено на фиг. 4.20.

Експерименталните изследвания на взаимодействието на микровълновия плазмен факел с течности са изложени в глава пета. Изследванията са направени в сътрудничество с: (1) екипа на Франтишек Кръчма от Техническия университет в Бърно, Чехската република (изследване на взаимодействието микровълнова плазма–вода) и (2) екипа на Яна Топалова от Катедрата по обща и приложна хидробиология, Биологическия факултет на СУ (изследване върху бактерицидния ефект на микровълнов плазмен факел и плазмено третиране на моделни вълни).

Схема на експерименталните компоненти е представена на фиг. 5.1б, а снимка на аргонския сѳратронен плазмен факел – на фиг. 5.1а. Вода, поставена непосредствено под плазмения стѳлб, променя неговите геометрични размери. При ниска вълнова мощност, поради голямата относителна диелектрична проникваемост на водата при честота 2.45 GHz ($\epsilon_w \approx 80$) плазменият факел не прониква във водата. При това взаимодействие са наблюдавани три ефекта: първият ефект е, че при поставяне на вода под плазмения факел (така че плазмата да не допира водата) се променя дължината на плазмения стѳлб. Резултатите от това изследване са представени от ас. Маринова с поканен доклад на 7th International Workshop & Summer School on Plasma Physics (2016 г. в Китен) и са публикувани в IOP Conf. Series. При поставяне на водата на разстояние по-малко от дължината на плазмения факел са наблюдавани два различни случая, а именно плазменият стѳлб да се плъзга по повърхността на водата без да променя формата ѝ, или плазменият факел да образува вдлъбнатина (вдлъбнат меникс) на повърхността на водата. Част от тези резултати са публикувани в рамките на COST 7 акция TD1208 в Plasma Medicine. Промяната на дължината на плазмения факел при мощности от 12 до 40 W при отсъствие и наличие на вода под разряда е илюстрирана на фиг. 5.5. При слаб газов поток се наблюдава светло петно върху водната повърхност, което всъщност представлява 3–4 въртящи се пръстеновидни плазмени структури, които се плъзгат по водната повърхност. От своя страна те имат собствена структура както е показано на фигури 5.6а,б. При увеличаване на газовия поток, както споменахме по-горе, се образува вдлъбнат меникс, който генерира вълни по повърхността на водата (фиг. 5.7а,б), които се предават на плазмения стѳлб и той извършва вълнообразни движения. На фиг. 5.8 са показани последователни кадри от заснемането на плазмения факел в рамките на 6 ms.

Газовата температура на разряда е от голямо значение при третиране на обекти, чувствителни към нагриване. С използването на емисионна спектроскопия дисертантът оценява ротационната температура на ОН линиите и електронната температура. В силно неравновестната микровълнова плазма газовата температура е значително по-ниска от ротационната. Тези две температури обаче имат аналогично поведение и подобни зависимости от разрядните условия. При изследване на зависимостта на ротационната температура от разрядните условия са варирани три параметъра: дебелината на разрядната трѳба, газовия поток и вълновата мощност. При проведения експеримент са използвани две диелектрични трѳби (с $\epsilon_d = 3.8$) с вътрешен радиус $R_{in} = 1$ mm и външни радиуси R_{out} съответно 2 и 3.5 mm. Газовият поток се изменя от 0.48 до 3.2 l/min, а вълновата мощност в интервала от 14 до 24 W. Установените зависимости на двете температури от разрядните условия са илюстрирани на фигури 5.15 и 5.16. При поставяне на съд с вода на различни разстояния от водната повърхност от края на плазмения факел са измерени T_e и T_{rot} . От показаните на фигури 5.18а и 5.18б зависимости се вижда, че колкото по-близо е водната повърхност до края на плазмения стѳлб, толкова по-високи са T_e и T_{rot} .

Физичните и химичните свойства на водата (рН и концентрацията на H_2O_2) се променят при третиране с плазма в резултат от взаимодействието на водата с голям брой заредени и възбудени частици на плазмата. На фиг. 5.21 е показана зависимостта на концентрацията на H_2O_2 от обема на третираната вода с повърхност 23.8 cm² за по-големи обеми течност. При плазменото третиране на

моделни води (с органичните замърсители COD и NH_4^+) йоните се окисляват и намаляват концентрациите си с около 20% за COD и със 7–10% за NH_4^+ .

Наличието на микроорганизми в отпадните и питейни води създава рискове и необходимост от тяхната дезинфекция. Студената атмосферна плазма (САП) предлага ефективен метод, който позволява по-широка област на приложимост, включително и върху живи организми. Дисертантът е изследвал ефекта от плазмено третиране на микроорганизми в две конфигурации: (1) на монобиофилм от *Pseudomonas sp. AP-9* върху твърда хранителна среда (агар) с начална микробна плътност 2×10^7 cells/ml и пряко третиране на бактериални суспензии от *Brevibacillus laterosporus BT-271* с плътност 10^8 – 10^9 cells/ml. Този бактерициден ефект е илюстриран на фиг. 5.28 при вълнова мощност 22 W. Третирането с плазма води до значителни промени върху повърхността на клетките и до изменения във формата им. След 40 s третиране с плазма голяма част от клетките на *Pseudomonas sp. AP-9*, се отличават със силно увредена клетъчна повърхност. При по-дълго време на третиране (50 s) клетките са по-силно деформирани, някои от тях са напълно разрушени и се наблюдава изтичане на клетъчно съдържание в средата. Във връзка с тези изследвания имам два въпроса към дисертанта: (1) До каква степен предсказанията от теорията оптимални параметри на разряда, осигуряващи дезинфекция на отпадни и питейни води, както и на микроорганизми при атмосферно налягане, се потвърждават от проведените експерименти? (2) Ако плазменият фокус наистина ефективно дезинфектира водата, може ли да се приложи в големи мащаби, защото водата е проблем от национално значение и е свързан с националната сигурност на България.

4. Научни приноси. Приемам формулираните на стр. 125 научни приноси, получени в дисертационния труд на ас. Пламена Маринова. Те може да се категоризират като **обогатяване на съществуващите знания и новост в науката (предлагане на нов, усъвършенстван едноразмерен феноменологичен модел на повърхнинновълнови разряди при атмосферно налягане).**

Новите знания са получили положителен отзив от плазмофизичната колегия: забелязани са 8 цитирания на двете статии, убликувани в *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018; освен това резултатите са докладвани на 21 международни конференции като дисертантът е изнесъл три устни доклада. По време на докторантурата си ас. Маринова е посетила два пъти Технологичния университет в Бърно, Чехската република.

Авторефератът отразява вярно съдържанието на дисертационния труд.

5. Критични бележки на рецензента. Като цяло дисертационният труд е написан грамотно. Не липсват множество правописни грешки, неточно използване на препинателни знаци и други дребни несъвършенства. Например в аргумента на експоненциалната функция имагинерната единица е представена с курсивно вместо право “i”. С прави букви трябва да се пишат редица етикети в ур. (3.17). В глава пета от фиг. 2 се скача на фиг. 5 и от фиг. 5.8 на фиг. 5.15. Надписът към фиг. 5.7 не е довършен (трябва да се добави “диаметри”). В цитат **10** не е дадено заглавието на статията, както и списанието (том, година, страници). В много цитати липсват малките имена на авторите. Всички изброени недостатъци имат чисто технически характер и ни най-малко не накърняват ценните научни резултати, изложени в дисертационния труд.

5. Заключение. Като имам предвид сложния проблем (изграждане на самосъгласуван феноменологичен едноразмерен модел на разряди при атмосферно налягане, създавани и поддържани от бягащи електромагнитни вълни), с решаването на който дисертантът се е справил блестящо, и научните резултати (съдържащи се в публикуваните статии и в дисертационния му труд), намерили отзвук в осем цитирания, както и обстоятелството, че представената дисертация напълно удовлетворява приетите във Физическия факултет на СУ “Св. Климент Охридски” и от Закона за развитието на академичния състав в България критерии за придобиване на научна степен, с удоволствие препоръчвам на уважаемите членове на Научното жури да гласуват за присъждане на образователната и научна степен **доктор по физика на плазмата и газовия разряд** на г-жа Пламена Атанасова Маринова.

София, март 2020 г.

Р е ц е н з е н т:

/проф. дфн Иван Желязков/