



*Софийски университет „Св. Климент Охридски“*

Физически факултет

*катедра „Оптика и спектроскопия“*

---

**Пламена Атанасова Маринова**

*МОДЕЛИРАНЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА  
НЕРАВНОВЕСНА ПЛАЗМА*

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за придобиване на образователна и научна степен

„ДОКТОР“

Професионално направление: 4.1 Физически науки

Научна специалност: Физика на плазмата и газовия разряд

Научен ръководител: доц. д-р. Евгения Бенова

---

*София, 2020 г.*

Пламена Маринова е редовен докторант към катедра „Оптика и спектроскопия“, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“ в периода 2014-2017 г.

Дисертацията е обсъдена на разширен Катедрен съвет на катедра „Оптика и спектроскопия“, Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“ на 30.01.2020 г.

Експерименталните изследванията са проведени в сътрудничество с:

- екипа на проф. Франтишек Кръчма от Техническия университет в Бърно, Чехия – изследване на взаимодействие на микровълнов плазма с вода;
- екипа на проф. Яна Топалова от Катедрата по Обща и приложна хидробиология, Биологически факултет, СУ “Св. Климент Охридски” – изследвания върху бактерицидния ефект на микровълнов плазмен факел и илазмено третиране на моделни води.

### **Данни за дисертационния труд:**

Брой страници в дисертацията: 145

Брой фигури: 101

Брой таблици: 3

Брой приложения: 2

Брой на цитирани литературни източници: 92

Брой публикации на автора по темата на дисертацията: 11

Брой доклади на международни и национални конференции: 19

- 1 поканен доклад
- 8 устни доклада
- 10 постера

### **БЛАГОДАРНОСТИ:**

Бих искала да изкажа искрени благодарности към моя научен ръководител доц. д-р. Евгения Бенова затова, че ме окуражи преди и по време на докторантурата, както и за всички ценни съвети и напътствия.

Блгодаря на екипа на проф. Франтишек Кръчма от Техническия университет в Бърно и екипа на проф. Яна Топалова от Катедрата по Обща и приложна хидробиология, Биологически факултет, СУ “Св. Климент Охридски” за ползотворното сътрудничество.

Не на последно място искам да благодаря на моето семейство за подкрепата им през цялото това време.

Тази работа е осъществена с финансовата подкрепа на:

Проект *Ефекти и механизми на въздействие на електрически разряди в газове и течности върху моделни биологични системи* No DH08/8 от 2016 на Фонд научни изследвания

CEEPUS network AT0063 *Applications and diagnostics of electric plasmas*

COST Action TD1208 *Electrical Discharges with Liquids for Future Applications*

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Деканата на Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“, стая А421.

## Списък на използваните съкращения

- САП – студена атмосферна плазма
- ТЯС – термоядреният синтез
- ТДР – термодинамично равновесие
- ЛТДР – локално термодинамично равновесие
- ВЧ – високочестотно
- ЕЦР – електронен циклотронен резонанс
- DBD – dielectric-barrier discharge (диелектричният бариерен разряд)
- УВ – ултравиолетово лъчение
- RONS – reactive oxygen and nitrogen species (реактивни частици като азотни и кислородни съединения)
- MRSA – Methicillin-resistant Staphylococcus aureus (Метицилин-резистентен стафилокок)
- ANS – aromatic amines (ароматните амини)
- MW – microwave (микровълновото)
- D-T – деутериево-тритиева
- D-D – деутериево-деутериева
- SEM – scanning electron microscope (сканиращ електронен микроскоп)
- dw – дестилирана вода
- tw – питейна вода от чешмата
- CAP – cold atmospheric plasma (студена атмосферна плазма)
- ЕМ – електромагнитна
- ПАВ – плазмено активирана вода
- ФРЕЕ – функцията на разпределение на електроните по енергии
- ФРЕС – функцията на разпределение на електроните по скорости
- PIC – компютърни симулации от вида particle-in-cell
- PIC-MCC – компютърни симулации от вида Particle-in-cell/Monte Carlo collision simulations
- PS – plasma bulk – sheath (пристенен слой)
- ДНК – дезоксирибонуклеиновата киселина
- UV – ultraviolet (ултравиолетово лъчение)
- COD – chemical oxygen demand (химично потребление на кислород)
- VOCs – Volatile organic compounds (Toluene, Benzene, Acetone)

## СЪДЪРЖАНИЕ

<b>I. Обща характеристика на дисертационния труд</b>	<b>5</b>
1. Актуалност на темата .....	5
2. Цел и задачи на дисертационния труд .....	5
3. Принос на автора .....	5
4. Обем и структура на дисертацията .....	6
<b>II. Кратко изложение на дисертационния труд</b>	<b>7</b>
I. УВОД .....	7
II. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР .....	9
2.1 Повърхнинновълнови разряди .....	9
2.2 Приложения на неравновесна плазма .....	10
2.2.1 Неравновесна плазма за биомедицински приложения .....	11
2.2.2 Неравновесна плазма за екологични приложения .....	11
2.3 Моделиране на неравновесна плазма .....	12
2.3.1 Повърхнинновълнови разряди .....	12
2.3.2 Типове модели .....	13
2.3.3 Самосъгласувани модели .....	14
III. САМОСЪГЛАСУВАН МОДЕЛ НА ПОВЪРХНИННОВЪЛНОВ РАЗРЯД ПРИ АТМОСФЕРНО НАЛЯГАНЕ .....	17
3.1 Електродинамична част .....	17
3.1.1 Вълново уравнение и компоненти на полето на вълната .....	18
3.1.2 Локален дисперсионен закон .....	18
3.1.3 Уравнение за баланс на енергията на вълната .....	20
3.2 Кинетична част .....	21
3.2.1 Схемата на енергетичните нива и елементарни процеси в плазмата .....	21
3.2.2 Кинетика на електроните .....	21
3.2.2.1 Уравнение на Болцман .....	21
3.2.2.2 Функция на разпределение на електроните по енергии .....	22
3.2.3 Кинетика на тежките частици .....	23
3.3 Самосъгласувана връзка между кинетичната и електродинамичната части на модела .....	23
3.4 Числени пресмятания .....	24
IV. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛИРАНЕ .....	25
4.1 Кинетика на елементарните процеси и на атомите и йоните .....	25
4.2 Изследване на ефекта на самосъгласуваната връзка честота на удари електрони-неутрал с предаване на импулс върху резултатите от модела .....	25
4.3 Влияние на заобикалящата плазмата среда върху вълновите и плазмените характеристики .....	27
V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА МИКРОВЪЛНОВ ПЛАЗМЕН ФАКЕЛ С ТЕЧНОСТИ .....	28
5.1 Плазмен източник и експериментални методи .....	28
5.2 Изменение на плазмените характеристики при взаимодействие на плазмения факел с дестилирана вода .....	29
5.2.1 Промяна в дължината на плазмения стълб .....	29
5.2.2 Взаимодействие на плазмата и водата при малък газов поток .....	30
5.2.3 Взаимодействие на плазмата и водата при голям газов поток .....	30
5.3 Ротационна и електронна температура на микровълнов плазмен факел .....	31

5.4 Изменение на характеристиките на водата в резултат на взаимодействието с микровълновия плазмен факел .....	33
5.4.1 Определяне на относителна концентрация на водороден пероксид в третирана с плазма вода.....	33
5.4.3 Приложения на повърхнинновълнова плазма за третиране и почистване на води.	34
5.5 Стерилизационния ефект при плазмено третиране .....	34
5.5.1 Бактерициден ефект на при пряко плазмено третиране на монобиофилм от <i>Pseudomonas sp.</i> AP-9 .....	34
5.5.2 Бактерициден ефект при плазмено третиране на бактериални суспензии от <i>Pseudomonas sp.</i> AP-9 и <i>Brevibacillus laterosporus</i> BT-271 .....	35
VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	36
<b>III. Научна дейност на докторанта</b>	<b>37</b>
I. Публикации в реномирани международни списания с импакт-фактор .....	37
II. Публикации в реномирани международни списания, реферирани в Scopus с SJR .....	37
III. Публикации в материали на конференции в пълен текст .....	37
IV. Участия в научни национални и международни семинари и конференции: .....	38
V. Посещения в други научни центрове и университети.....	39

# I. Обща характеристика на дисертационния труд

## 1. Актуалност на темата

През последното десетилетие развитието на плазмените технологии напредва много бързо. Паралелно с изучаването на вече съществуващите плазмени източници, все повече се разширяват и областите им на приложение. Едновременно с това се оптимизират плазмените устройства и се създават нови, такива че да отговарят на изискванията към параметрите на плазмата, които поставят новите им приложения.

Днес плазмата намира своето важно място в интердисциплинарни приложения в области като екология, медицина и земеделие. Развитието на подходящи и надеждни нискотемпературни плазмени източници при атмосферно налягане дава възможност плазмата да работи в отвореното пространство и да има достатъчно ниска температура, за да позволява третиране на живи организми и температурно чувствителни материали. Директното третиране на тъкани, биологични системи и течности, без те да бъдат увредени, представлява огромен интерес за учените от всички свързани области на науката. Третирането на води с цел пречистване или активиране (плазмено активирана вода), третирането на бактерии с цел дезинфекция и третирането на рани са само част от интердисциплинарните приложения на плазмата. Всички те поставят изискването режимите на работа, физичните и химичните параметри на плазмата да бъдат много добре изучени. Изследват се главните механизми на взаимодействие на плазмата с други обекти и влиянието на плазма върху различни техни характеристики.

## 2. Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на настоящия дисертационен труд са теоретични и експериментални изследвания на неравновесната плазма. За плазмен източник се използва повърхнинновълнов разряд в аргон при атмосферно налягане.

За реализиране на поставената цел са формулирани следните **задачи**:

- Изследване на плазмените параметри на микровълнов разряд в аргон при атмосферно налягане и различни газоразрядни условия с помощта на самосъгласуван модел
- Експериментално изследване на параметрите на получената плазма
- Експериментално изследване на плазмените параметри при взаимодействие на плазмата с течности (дестилирана и питейна вода, моделни води с различни неорганични и органични замърсители)
- Експериментално изучаване на промяната на физичните и химичните свойства на течности в контакт с микровълнов плазмен факел
- Изследване на бактерицидния ефект на микровълнов плазмен факел с цел използването му за биомедицински и екологични приложения

## 3. Основни приноси на автора

Основните приноси могат да бъдат формулирани по следния начин:

1. Съществуващият кинетично-електродинамичен самосъгласуван модел на повърхнинновълнов разряд в аргон при атмосферно налягане е допълнен и подобрен, като е отчетено изменението на честота на удари електрони–неутрали с предаване на импулс при изменение на електронната концентрация по дължината на плазменния стълб. Показани са големите различия в аксиалните профили на плазмените параметри с и без отчитане на тази зависимост.
2. Определени са разрядните условия, които най-силно влияят на ротационната (респективно на газовата) и електронната температура на плазмата и те са дебелината и диелектричната проницаемост на разрядната тръба, газовият поток и вълновата мощност.
3. За първи път теоретично и експериментално е изследвана промяната на характеристиките на микровълнов плазмен факел при взаимодействието му с течности. Наблюдавано е

удължаване на плазмения факел, получаване на пръстовидни структури, плъзгащи се по повърхността на водата, вдлъбнат мениск на водната повърхност и механични вълни по мениска и факела, при различен газов поток и вълнова мощност. Получено е, че ротационната и електронната температура на плазмения факел са по-високи, когато под него се постави вода и се повишават с приближаване на водната повърхност към края на факела.

4. Изследван е ефектът от третиране на дестилирана и питейна вода с повърхнинновълнов плазмен факел. Показано е получаване на  $H_2O_2$  в дестилираната вода, чиято концентрация расте с увеличаване времето на третиране. Проводимостта и на дестилираната, и на питейната вода нараства, докато рН на питейната вода не се променя, а на дестилираната се повишава.
5. При относително кратко време на плазмено третиране (30 s и 60 s) на моделни води с голяма концентрация на типични битови и промишлени замърсители е постигнато намаляване на концентрацията на замърсителите. Тези експерименти дават обещаващи резултати за използване на микровълновата плазма в технология за почистване на води.
6. Микровълновият плазмен факел е използван за третиране на Грам отрицателни и Грам положителни микроорганизми в харнителна среда (агар) и в суспензия. Получените резултати показват силен бактерициден ефект.

#### 4. Структура на дисертацията

Работата се състои от увод, 4 глави, заключение и две приложения. Формулирани са основните приноси на дисертационния труд, представени са списък на публикациите, участия в научни национални и международни семинари и конференции и цитирана литература.

**В първа глава** е направен обзор на повърхнинновълновите разряд и приложения на неравновесна плазма. Разгледани са възможностите за приложение на неравновесната плазма в биологията и медицината, въздействието върху бактерии и биомолекули, екологични приложения, плазмено обработване на повърхности, плазмата в селско стопанство. Разгледани са съществуващите теоретични модели на неравновесна плазма.

**Във втора глава** е представен самосъгласуван кинетично-електродинамичен модел на повърхнинновълнов разряд.

**В трета глава** са представени получените резултати от самосъгласувания модел на повърхнинновълнов разряд. Описани са резултатите от кинетичната част модела: функцията на разпределение на електроните по енергии (ФРЕЕ), скоростни константи, честотата на удари електрони–неутрали с предаване на импулс, заселеностите на възбудените нива. В електродинамичната част на модела е изследван ефектът на зависимостта на честотата на удари електрони-неутрал с предаване на импулс от електронната концентрация върху резултатите от модела. Показано е и влияние на параметрите на заобикалящата плазмата среда (дебелина и диелектрична проникваемост) върху вълновите и плазмените характеристики.

**В четвърта глава** са представени експериментални изследвания на взаимодействие на микровълнов плазмен факел с течности. Описано е изменението на плазмените характеристики при взаимодействие на плазмения факел с течности, както и изменение на характеристиките на течностите (дестилирана и питейна вода, моделни води с различни неорганични и органични замърсители) в резултат на взаимодействието с микровълновия плазмен факел. Разгледан е бактерицидният ефект на плазмено третиране.

**Приложение 1:** Елементарни процеси включени в модела

**Приложение 2:** Определяне на плазмените параметри с помощта на емисионна спектроскопия

\*В изложението в автореферата номерацията на фигурите, формулите и цитираната литература следва номерацията в дисертацията, за по-лесно ориентиране.

## II. Кратко изложение на дисертационния труд

### I. УВОД

Нискотемпературната плазма е постигнала значимо влияние върху обществото през последния половин век. Разработването на нискотемпературните плазмени технологии предоставят нови възможности за подобряване на качеството на живот и отварят нови области за съвременни научни изследвания.

Развиването на физиката на нискотемпературната плазма и плазмени технологии е придобило интердисциплинарен характер. Новите плазмени източници позволяват плазмените параметри да бъдат изменяни в много големи интервали – няколко порядъка на величините. Това позволява плазмата да намира приложение в съвсем различни направления – от индустриални приложения до биомедицински приложения и екология. Вследствие на това е трудно да се следват тенденциите в научните изследвания и технологиите и не е лесно да се идентифицират основните предизвикателства в тази област и многобройните ѝ подобласти.

Необходимо е по-нататъшно задълбочено изучаване на плазмените параметри и адаптиране на плазмените източници с цел оптимизирането им. За развитието на иновативните плазмени приложения е важно създаването на стабилни плазмени източници, осигуряващи предвидим контрол върху плазмените параметри в зависимост от поставените изисквания.

Нуждите на новите области на приложение поставят много изисквания към източниците на плазма – да бъдат малки, евтини и да осигурят високи концентрации на заредените частици. Важни условия за плазмено третиране на живи организми са пламеният източник да работи в отворено пространство, т.е. при атмосферно налягане и при ниска газова температура. Неравновесните плазми при атмосферно налягане отварят нови възможности за създаване на студена плазма, която да работи в отвореното пространство. Това води до намаляване на разходите за създаване на устройства за студена атмосферна плазма (САП) и позволява работа с обекти, които не могат да бъдат поставени във вакуумна камера.

Плазмата е многокомпонентна система, включваща едновременно ултравиолетово лъчение, електрично поле, реактивни и заредени частици, топлинна компонента, което определя трудностите при изследване на взаимодействието ѝ с различни материали. За изучаване на тези взаимодействия е необходимо разработване на нови експериментални методи и нови модели, които да позволят разбиране и контрол на протичащите физични и химични процеси. С навлизането на САП в области като биологията и медицината към обектите на взаимодействие се добавят и нови, като органични материали и живи тъкани. Това е допълнително предизвикателство за работата в тази област.

Така през 2008 г. в доклад на Department of Energy Office of Fusion Energy Sciences на Workshop on Low Temperature Plasmas (публикуван online [https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/workshop-reports/Low\\_temp\\_plasma\\_workshop\\_report\\_sept\\_08.pdf](https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/workshop-reports/Low_temp_plasma_workshop_report_sept_08.pdf)) са поставени следните въпроси:

*Как могат да бъдат оптимизирани плазмените източници, така че да създават плазма с необходимите плазмени параметри?*

*Как взаимодействието на плазмата с други вещества влияе на състава, стабилността и параметрите на плазмата?*

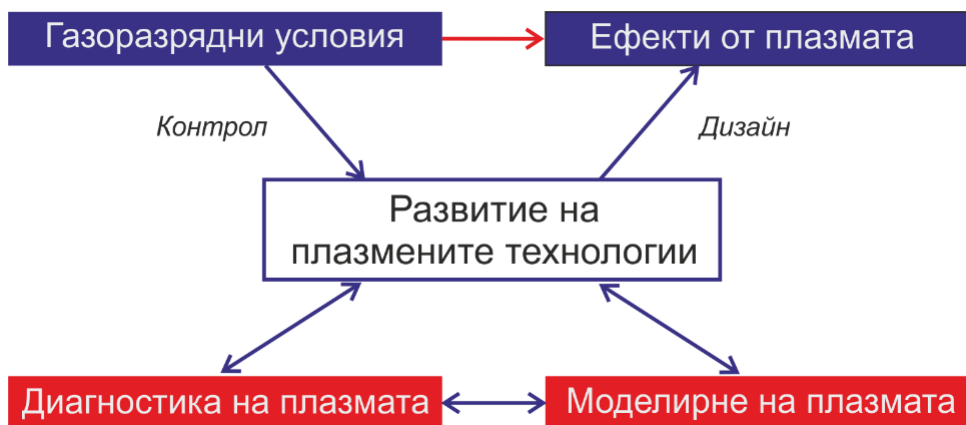
*Как плазмата създава и модифицира наночастици за производство на нови функционални наноматериали?*

*Как нискотемпературните плазми взаимодействат с органични вещества и живи тъкани?*

*Как взаимодействията сложната система от плазмени компоненти със сложна повърхност, за да осигури уникални реакции при обработката на материалите?*

Отговори на тези въпроси могат да бъдат намерени само със съвместна работа на мултидисциплинарни екипи при теоретичните и експерименталните изследвания на неравновесната плазма (фиг. 1.1).





Фиг. 1.1 Развитие на плазмените технологии.

През 1879 година английският учен сър Уилям Крокър наблюдава за първи път наречената от него "лъчиста материя". Тя представлява поток от заредени частици, ускорени в електрично поле. Първите изследвания на свойствата ѝ прави британският физик сър Дж. Дж. Томсън. През 1928 година американският химик Ирвинг Ленгмюр за първи път въвежда наименованието „плазма“. Изучаването на плазмата представлява сериозен интерес за съвременната физика, тъй като голяма част от материята във Вселената се намира в плазмено състояние. Разпространението на плазмата обхваща слънчевото ядро и корона, междузвездното пространство, звездите и техните атмосфери, газовите мъглявини, плазмените радиационни пояси на Земята, слънчевия вятър, мълните, полярните сияния, йоносферата и т.н. Въпреки не много дългия период на изучаване на плазмата, сега е известно, че около 99 % от веществото в природата е в това състояние.

Плазмата представлява газ, в който значителна част от атомите и молекулите са йонизирани, т.е. наред с неутралните частици има и заредени частици – електрони и йони. Наличието на заредени частици води до важно свойство – електропроводимост, което отличава плазмата от останалите газове.

Друго характерно свойство на плазмата е нейната електронеутралност. То се дължи на взаимното компенсиране на положителните и отрицателните заряди (йони и електрони). Това е възможно само за достатъчно големи разстояния и интервали от време или така наречените пространствени и времеви мащаби за разпределение на зарядите. Пространственият критерий за съществуване на плазма е радиусът на Дебай.

Два определящи за свойствата ѝ плазмени параметъра са концентрацията на заредени частици и температурата. В зависимост от тях плазмата може да бъде различни видове. Според **електронната концентрация** плазмата може да бъде разделена на три вида: слабо йонизирана ( $10^{-6} < \eta < 10^{-3}$ ), частично йонизирана ( $10^{-3} < \eta < 1$ ) и напълно йонизирана ( $\eta \rightarrow 1$ ), където  $\eta$  е степента на йонизация – отношението на концентрацията на електроните към пълната концентрация на тежките частици.

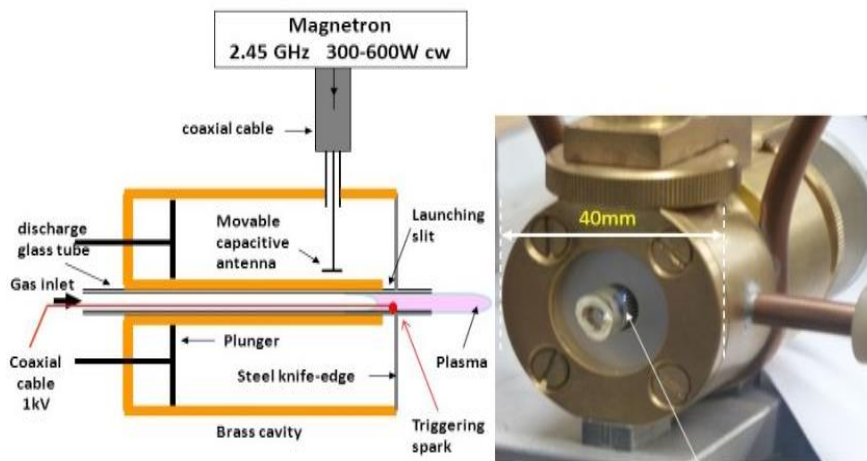
Плазмата е многокомпонентна система от електрони, йони и неутрални частици. Всеки тип частици се характеризира с различна средна енергия. Температурата на съответната компонента може да бъде дефинирана, когато системата е в термодинамично равновесие.

Други определящи свойствата на плазмата параметри са **електронна температура**  $T_e$  и **йонната температура**  $T_i$ . Те могат да бъде изразени в енергетични единици поради наличието на връзката между средната енергия на топлинно движение и температурата. Според температурата на йоните плазмата може да бъде класифицирана като на нискотемпературна при  $T_i < 10^5$  K високотемпературна  $T_i > 10^5$  K.

## II. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

### 2.1 Повърхнинновълнови разряди

Възможността за разпространение на електромагнитни вълни на границата на цилиндричен плазмен стълб и диелектрик е представена за първи път от Trivelpiece и Gould [1] през 1959 г. Вълната е класифицирана като повърхнинна и се явява собствен плазмен мод. Идеята, че плазмата може да се създава и поддържа от електромагнитна вълна, се потвърждава експериментално през 1970 г., когато Tuma [2] получава ксенонов стълб в кварцова тръба, единият край на която е поставен напречно в правоъгълен метален вълновод. През 1974 г. във Phys. Letters A [3] е публикувано съобщение на Moisan, Beaudry и Lепrinсе, в което те представят идеята за собствените модове на цилиндричен плазмен стълб, наречени повърхнинни вълни. По-късно Moisan патентова устройство, което възбужда електромагнитни повърхнинни вълни, наречено от него сърфатрон (фиг. 2.1).



Фиг. 2.1 Схема (ляво) и снимка (дясно) на сърфатрон

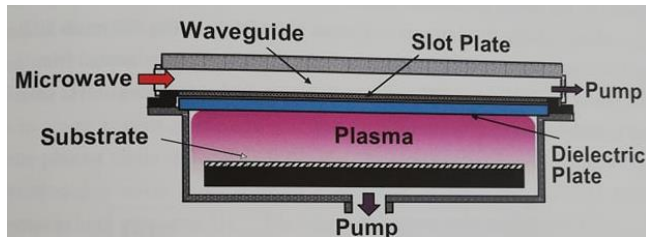
Това устройство създава плазма със значителни преимущества пред останалите безелектродни разряди като: по-висока електронна концентрация при дадена мощност, чиста плазма (липса на примеси от разпрашване на електроди), добра стабилност и възпроизводимост, малък възбудител в сравнение с размера на плазмения стълб. Впоследствие са разработени и други устройства – сърфагайд, вълноводен сърфатрон и Ро-бокс, с различни характеристики. В своите статии Moisan и Zakrzewski [4, 5] обобщават характеристиките на източниците на повърхнинни вълни и принципите за поддържане на плазмен стълб от повърхнинни вълни.

При източниците на плазма, създавана от повърхнинни вълни, разпространяващата се повърхнинна електромагнитна вълна нагрява електроните, които от своя страна йонизират и възбуждат тежките частици и създават плазмата. Така създадената плазма е част от вълноводната структура, по която вълната се разпространява.

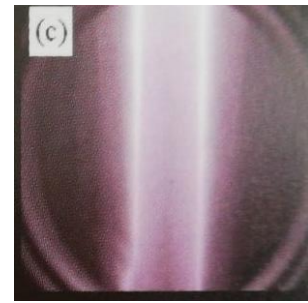
Плазменият стълб, създаван и поддържан от повърхнинна вълна, представлява интерес за изследване и приложения, поради широкия диапазон от работни условия:

- ✓ Честота на вълната: 10 MHz – 10 GHz
- ✓ Налягане на газа: mTorr – няколко atm
- ✓ Диаметър на тръбата: 1 mm – 12,4 cm
- ✓ Дължина на плазмения стълб: няколко cm – 6 m (в зависимост от мощността на вълната)
- ✓ Газ: инертни газове, молекулни газове, газови смеси.

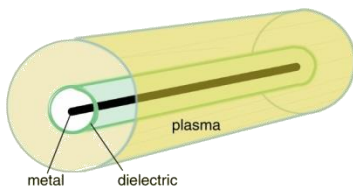
Плазмата, създавана от повърхнинна вълна може да се раздели на няколко вида в зависимост от газоразрядната геометрия: планарен (slot antenna, фиг. 2.3 а), коаксиален разряд (фиг. 2.3 в), цилиндричен разряд (фиг. 2.3 г, д) и разряд около диелектричен цилиндър (фиг. 2.3 б). В нашата лаборатория, използвайки възбудители тип сърфатрон можем да получим плазма при атмосферно налягане в две конфигурации – плазма в диелектрична тръба (фиг. 2.3 в) и плазмен факел в отвореното пространство (фиг. 2.3 б).



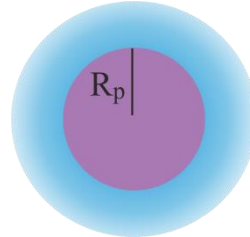
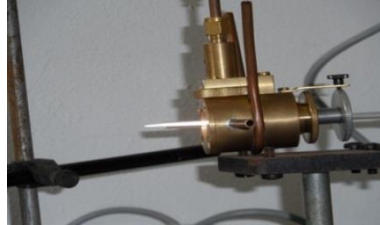
Фиг. 2.3 (а) Конфигурация на планарен плазмен източник



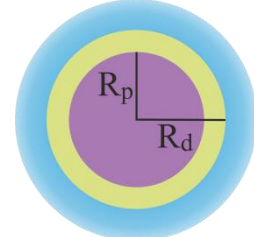
Фиг. 2.3 (б) Разряд около диелектричен цилиндър



Фиг. 2.3 (в) Конфигурация на коаксиален разряд



Фиг. 2.3 (г) Конфигурация на плазмен факел



Фиг. 2.3 (д) Конфигурация на плазма в диелектрична тръба

Независимо от начина на възбуждането си, повърхнинната вълна може да създава стабилна плазма както при ниско, така и при атмосферно налягане. При честота на вълната 2,45 GHz и малък диаметър на разрядната тръба плазмата може да съществува и извън тръбата, формирайки в отвореното пространство (въздух) стабилен плазмен факел.

Получената плазма е неравновесна,  $T_e \gg T_g$ , газовата температура може да варира от няколко хиляди келвина до стайна температура (студена плазма),  $T_g \sim T_{\text{room}}$  и може да работи в отвореното пространство (атмосферно налягане). Преимущество на източника е, че позволява ефикасно и възпроизводимо да се променят газоразрядните условия.

## 2.2 Приложения на неравновесна плазма

През последното десетилетие развитието на плазмените технологии напредва много бързо. Днес плазмата намира своето важно място в интердисциплинарни приложения в области като екология, медицина и земеделие. Развитието на подходящи и надеждни нискотемпературни плазмени източници при атмосферно налягане дава възможност плазмата да работи в отвореното пространство и да има достатъчно ниска температура, за да взаимодейства с живи организми и температурно чувствителни материали. Директното третиране на тъкани, биологични системи и течности, без те да бъдат увредени, представлява огромен интерес за учените от всички свързани области на науката. Третирането на води с цел пречистване или активиране (плазмено активирана вода), третирането на бактерии с цел дезинфекция и третирането на рани са само част от интердисциплинарните приложения на плазмата. Всички те поставят изискването режимите на работа, физичните и химичните параметри на плазмата да бъдат много добре изучени. Изследват се главните механизми на взаимодействие на плазмата с други обекти и влиянието на плазма върху различни техни характеристики.

Основните газоразрядни източници, създаващи плазма с характеристики, отговарящи на горните изисквания, които се разработват и използват в последните години за тези цели, са диелектричният бариерен разряд (DBD) и различни варианти на плазмен факел. Обзор на основните характеристики на САП и на биомедицинските ѝ приложения е представен в [6].

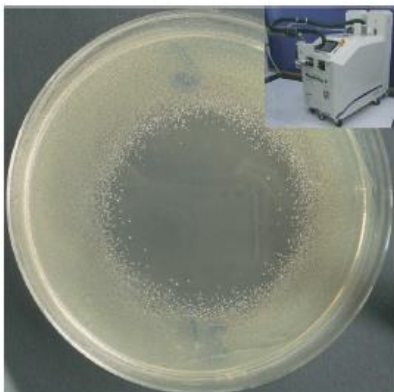
В последните десетина години интензивно се работи по плазмени приложения в далечни от физиката и техниката области като екология, селско стопанство и хранителна промишленост. Това е свързано с бурното разработване на нови плазмени източници, работещи при атмосферно налягане, без скъпоструваща вакуумна система. В много случаи обаче е необходимо третирането да се осъществява без топлинни увреждания, като осигурява същевременно висок бактерициден ефект. Основното изискване е плазмата да е неравновесна и студена, като средната енергия на електроните е  $\sim 1-2$  eV, докато температурата на тежките частици е значително по-ниска и близка до стайна температура. Студената атмосферна плазма предлага алтернативен метод, позволяващ ограничаване на използването на агресивни химикали и по-чиста околна среда. Огромното поле за изследвания в областта на нискотемпературната плазма е богато на интелектуално стимулиращи научни предизвикателства, където напредъкът в науката бързо се превръща в технологии, които предоставят обществени ползи.

Така в последните години възниква нова научна област, плазмената медицина, която изисква мултидисциплинарни изследвания, обединяващи плазмени физици, инженери, химици, биолози, медици.

За разлика от конвенционалните методи, които залагат на действието на един фактор (висока температура, химически активно вещество или ултравиолетово (УВ) лъчение), при плазменото третиране едновременно действат голям брой активни агенти: заредени частици (електрони и йони), силно химически активни радикали и възбудени атоми, УВ лъчение, електромагнитно поле, в някои случаи и нагряване (при висока температура на тежките частици в плазмата).

### 2.2.1 Неравновесна плазма за биомедицински приложения

Плазмената стерилизация се изучава и с цел подпомагане на борбата с вътрешноболничните инфекции, причинени от Метицилин-резистентен стафилокок (MRSA) и *Clostridium difficile*. Този вид инфекции болните получават при не добра хигиена на болничното оборудване. Фигура 2.8 показва Метицилин-резистентен стафилокок след третиране с микровълнов плазмен факел в аргон при атмосферно налягане в Института Макс–Планк [9]. След 2 мин. третиране бактериите са култивирани за 24 часа. Резултатите показват, че върху мястото на действие на плазмата на практика няма живи бактерии. Този резултат обаче е последван от две предизвикателства към плазменния източник: за болнични цели (дезинфекция на подове, стени и оборудване) мащабът на влияние на плазмата трябва да бъде увеличен и трябва да бъдат намалени остатъчните елементи от третирането като  $\text{NO}_x$  и озон.



**Фиг. 2.8** Третиране на MRSA култура за 2 мин с плазмен източник MicroPlaSter. Наблюдава се чиста от бактерии зона с диаметър  $\sim 5.3$  cm. Топлинното въздействие на плазмата се изключва тъй като газовата температура на плазмата  $\sim 30$  °C, [9].

При използването на плазма за стерилизация важна роля има намаляване на времето за третиране и понижаване на температурата с цел оптимизиране на процеса и предпазване на температурно чувствителните обекти на стерилизиране.

### 2.2.2 Неравновесна плазма за екологични приложения

Разработването на плазмени реактори за екологични цели започва с изследването на възможността да бъдат пречиствани газове (отпадни газове от индустрията и въздух в затворени помещения). Употребата на САП в това направление е обещаваща, поради високата енергийна ефективност на този вид разряди в сравнение с разрядите при ниско налягане. Към това се добавя възможността да бъдат третирани няколко замърсителя едновременно за разлика от конвенционалните методи като катализата. Използването на неравновесна плазма за третиране на замърсен въздух води до генериране на озон и намаляване на замърсители като  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и VOCs (Volatile organic compounds – Toluene, Benzene, Acetone).

Следващото направление, което интензивно се развива в последните години е плазменото активиране и пречистване на води. Целите, които това направление си поставя, са използването на неравновесни плазмени източници в контакт с течности за:

- ✓ пречистване на води от микроорганизми, органични замърсители и др.;
- ✓ създаване на плазмено активирана вода (течности с повишено съдържание на активни частици);
- ✓ моделиране на физичните и химичните свойства на течности (киселинност, проводимост и др.);
- ✓ изследване на взаимодействието на плазмата с течности.

Наличието на микроорганизми в отпадните и питейните води създава рискове и необходимост от тяхната дезинфекция. Традиционните методи за стерилизация на различни обекти се свеждат до третиране с химикали или висока температура. Студената атмосферна плазма предлага алтернативен метод, който води до ограничаване използването на агресивни химикали и по-чиста околна среда. Този метод за пречистване на вода дава възможност да бъдат премахнати от водата живи микроорганизми и бактерии като *Escherichia coli*. [24]. Откроява се тенденцията в последно време да се разработват приложения на плазмата, при които тя е в течности или в контакт с течности.

## 2.3 МОДЕЛИРАНЕ НА НЕРАВНОВЕСНА ПЛАЗМА

### 2.3.1 Повърхнинновълнови разряди

Повърхнинновълновите разряди се използват успешно за голям брой технологични приложения през последните години. Техният успех се дължи на тяхната възпроизводимост и стъбилна работа в голям интервал от работно налягане, честота и възможността да работят в различни газове и газови смеси. Досега механизмът на създаване и поддържане на този вид разряди е добре изучен. Въпреки това пълно описание на разпространението на електроманитната вълна съвместно с процесите, протичащи в плазмата все още не е постигнато с помощта на моделирането при различни режими и условия на работа.

Модел, описващ разпространението на повърхнинна вълна около плазмен цилиндър във вълновод е представен още през 1958 г. от Trivelpiece и Gould [1]. Той се състои в следното: електромагнитната вълна, чийто вълнов вектор е паралелен на цилиндричен аксиално нехомогенен плазмен стълб с комплексна диелектрична проницаемост, се разпространява затихващо в аксиално направление. Това се описва чрез уравненията на Максуел. От теоремата на Пойнтинг се намира коефициентът на затихване на вълната, а балансът на енергията на вълната дава връзката между локалната електронна концентрация (тоалната електронна концентрация за дадено напречно сечение) и абсорбираната от вълната мощност на единица дължина. В този модел плазмата се разглежда като среда с аксиално намаляваща диелектрична проницаемост. Единствената информация, която се получава за плазмата, е аксиалното разпределение на електронната концентрация. Този модел се появява много преди първата поява на източниците тип сърфатрон. Така с появата на сърфатрона и неговото експериментално изследване се създават и много модели в опит да се опише получената плазма.

През последните десетилетия повърхнинновълновите разряди са предмет на активно теоретично и експериментално изучаване. Изследвания се провеждат от редица научни колективи в Софийския университет, Парижкия университет–юг (Франция), Университета в Монреал (Канада), Техническият университет в Лисабон (Португалия), Университета в Кордоба (Испания), Рурския университет в Бохум (Германия), Кайрския университет в Гиза (Египет), Федералният университет във Флорианополис (Бразилия), Техническият университет в Айнхховен и др.

Много теоретични работи са посветени на изследването на плазма, поддържана от повърхнинна вълна. Част от тези работи са: Zakrzewski *et al.* [46, 50, 63], Glaude *et al.* [47], Ferreira *et al.* [48,49, 52, 54, 56, 58, 59, 65], Mateev *et al.* [51], Zhelyazkov *et al.* [53, 57, 66], Boisse–Laporte *et al.* [55], Benova *et al.* [60, 69], Kortzhagen *et al.* [61], Sá *et al.* [62], Aliev *et al.* [64], Zhang *et al.* [67], V. Georgieva *et al.* [68].

### 2.3.2 Типове модели

Основните модели за теоретичното описание и изследване на този вид разряд са:

- електродинамични модели
- флуидни модели
- ударно-радиационни модели
- кинетични модели
- компютърни симулации
- самосъгласувни модели

Електродинамичните модели описват разпространението на електромагнитната вълна по вълноводна структура, съдържаща плазма. Основните уравнения са дисперсионното уравнение и уравнението за баланс на енергията на вълната. И двете се получават от уравненията на Максвел. Системата от тези две уравнения не е пълна и се нуждае от допълнителни зависимости, които могат да бъдат получени само от модел на газовия разряд.

Флуидните модели разглеждат плазмата като флуид от заредени частици – електрони в електромагнитно поле. Те описват плазмата чрез осреднени величини като плътности, средни скорости и т.н. Тези модели позволяват пресмятане само на електронната концентрация и не дават никаква информация за елементарните процеси и концентрациите на тежките частици (възбудени атоми и йони) в газовия разряд. По-обхватно описание представляват флуидните модели, които разглеждат плазмата като система от два флуида – електрони и йони в електромагнитно поле. Всеки от тях има своя специфична плътност, скорост и температура. Флуидните модели са приложими, когато ударите в плазмата са достатъчно много, така че да осигурят функция на разпределение на частиците по скорости, близка до тази на Максвел – Болцман.

Ударно-радиационните модели се основават на баланс на частиците, като се описват елементарните процеси. Скоростните константи на процесите се пресмятат от сеченията за взаимодействие като се приема, че функцията на разпределение на електроните по енергии (ФРЕЕ) е Максвелова. Сеченията за взаимодействие, коефициентите на подвижност и дифузия, както и електронната концентрация са външни параметри за тези модели. Ударно-радиационните модели позволяват пресмятане на концентрацията на йоните и възбудените атоми и електронната температура като функция на електронната концентрация.

В кинетичните модели се включват кинетика на електроните и тежките частици, но не се разглежда разпространението на вълната. При прилагането на тези модели се решава уравнението на Болцман и се получава истинската функция на разпределение на електроните по енергии. В повечето случаи за повърхнинновълнова плазма тя е не-Максуелова. Има две основни групи от кинетични модели в описанието на неравновесна плазма – локални и нелокални. Класификацията се базира на отношението на дължината за релаксация на електроните  $\lambda_e$  към характеристичния размер на нехомогенност на полето  $L$ . Локални кинетични модели се използват обикновено при повисоки налягания, когато  $\lambda_e \ll L$  и ФРЕЕ във всяка точка от разряда се определя от интензитета на локалното електричното поле в нея [73]. Нелокални модели се използват, когато имаме ниски налягания и е изпълнено  $\lambda_e \gg L$ . При такива условия в по-голяма част от времето електроните не изпитват нееластични удари.

Съществуват опити за прилагане на компютърни симулации от вида (PIC, PIC-MCC и т.н.) [40, 74]. Такова изследване прави Manuel Jimenez Diaz [74]. Той прилага PLASIMO tool-kit за описание на повърхнинновълнова плазма в аргон при високо и междинно налягане. Тук в рамките PLASIMO се обединява описанието на разпространяващата се вълна и симулация на процесите в аргона. Представени са получените резултати за дължината на плазменния стълб в зависимост от газоразрядните условия и аксиалното и радиалното разпределение на плазмените параметри като плазмена плътност и аргониви йони. Те показват добро съгласие с наличните експериментални резултати.

Поради комплексната физична картина на поддържане на плазмата от вълната, тези опити засега не успяват да опишат достатъчно пълно плазмените и вълновите характеристики. Най-пълното описание се дава от самосъгласуваните модели.

### 2.3.3 Самосъгласувани модели

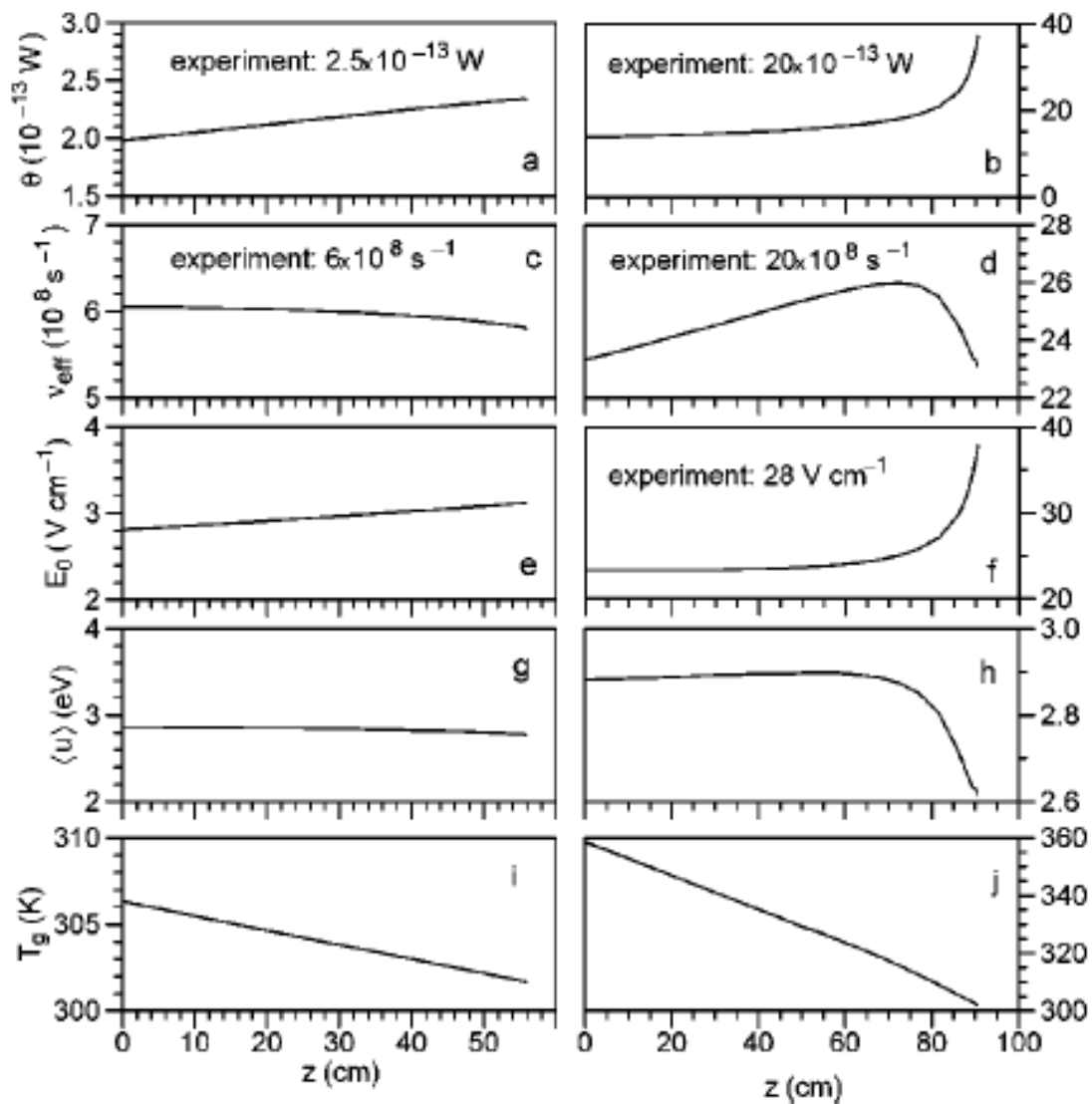
Самосъгласуваните модели на повърхнинновълновите разряди се състоят от две основни части:

1. електродинамично описание на разпространението на електромагнитната вълна (дисперсионно уравнение и уравнение за баланс на енергията на вълната);
2. модел на газовия разряд, който при различни автори е флуиден или кинетичен и от който се получават честотата на удари с предаване на импулс и средната енергия за създаване на двойка електрон-йон в разряда.

Тези две части трябва да бъдат решени съвместно. Съгласуваната връзка между тях се осъществява, като получените в модела на газовия разряд зависимости за честотата на удари с предаване на импулс и средната енергия за създаване на двойка електрон-йон в разряда се използват съответно в дисперсионно уравнение и уравнение за баланс на енергията (на вълната и на електроните).

Първият самосъгласуван радиален модел е представен от Ferreira през 1981 г. [47, 48]. Качествено моделът на плазмата е подобен на съществуващите тогава модели на положителен стълб, но тъй като радиалната компонента на височестотното електрично поле нараства към периферията на стълба, Ferreira е приложил флуиден модел за описание на радиалните свойства на електронната компонента. В този модел уравненията за непрекъснатост и радиален транспорт на заредените частици са свързани с вълновите характеристики, описващи слабозатихващо разпространение на поддържащата разряда вълна. Добавени са още условията за квазинеутралност на плазмата, даващо връзката между подвижността на електроните и коефициента на дифузия при Максвелова функция на разпределение на електроните по скорости, баланса на енергията на електроните и уравнението за абсорбираната мощност на единица дължина. Получени са радиалните разпределения на електронната концентрация, радиалните профили обезразмерените спрямо полето в центъра компоненти на електричното поле, електронната температура и абсорбираната от електроните мощност за изотермен разряд при аксиално осреднена електронна концентрация и вариране на налягането на аргона от 0.05 до 2 Torr [48].

Самосъгласуван модел, който описва плазма, създавана и поддържана от повърхнинна вълна, включващ численото решаване на пълния набор от електродинамични и кинетични уравнения, представят Ts. Petrova и E. Venova през 1999 г. [72]. Моделът включва решаването на уравнението на Болцман, уравненията за баланса на частиците и Максвеловите уравнения за разпространение на вълната, приложени с подходящи гранични условия. За определяне на газовата температура се използва уравнението за топлинен баланс. Моделът е приложен за повърхнинновълнов разряд в аргон при ниско и междинно налягане. Самосъгласуваността на кинетичната и електродинамичната част на модела се осъществява чрез баланса на енергията на вълната и електроните – абсорбираната от електроните вълнова мощност (пресметната в електродинамичната част на модела) се изразходва за йонизация и възбуждане и се пресмята в кинетичната част. Участващата в израза за абсорбираната от електроните вълнова мощност честота на удари електрон-неутрал с предаване на импулс, която също се пресмята в кинетичната част на модела, се използва като осреднена по дължината на плазменния стълб стойност. Като резултат са получени ФРЕЕ, скоростните константи на процесите, аксиалните разпределения на вълновите (компоненти на електромагнитното поле на вълната, вълнова мощност) и плазмените характеристики (концентрации на електрони, атомни и молекулни йони, възбудени атоми, средна енергия за създаване на двойка електрон-йон в разряда и честота на удари електрон-неутрал с предаване на импулс).

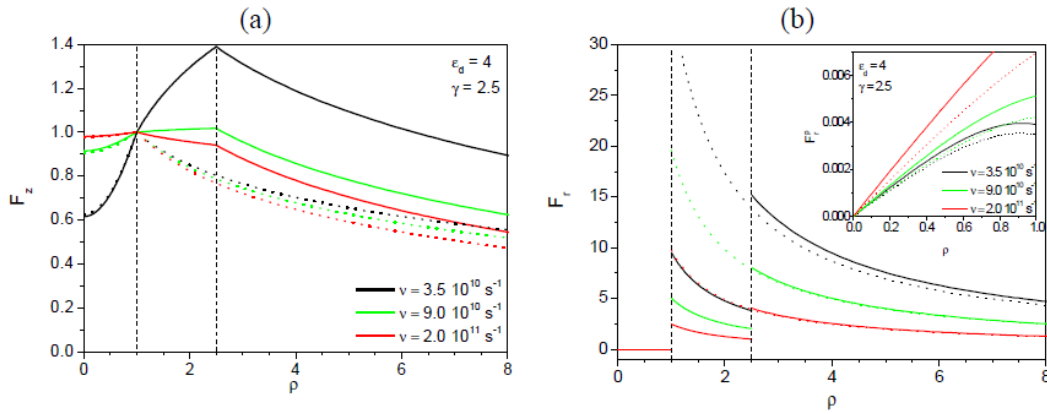


**Фиг. 2.25** Аксиални разпределения на средната мощност  $\theta$  за създаване на електрон-йонна двойка в разряда, ефективната честота на удари електрон-неутрал с предаване на импулс  $\nu_{\text{eff}}$ , амплитудата на електричното поле  $E_0$ , средната енергия на електроните  $\langle u \rangle$ , газовата температура  $T_g$  при различни разрядни условия: честота на вълната 390 MHz, налягане 250 mTorr,  $R_{\text{in}} = 3.8$  cm,  $R_{\text{out}} = 4$  cm,  $\epsilon_d = 4.0$  (ляво) и честота на вълната 2.45 GHz, налягане 1 Torr,  $R_{\text{in}} = 0.2$  cm,  $R_{\text{out}} = 0.4$  cm,  $\epsilon_d = 4.0$  (дясно) [72]

При атмосферно налягане честотата на удари електрон-неутрал с предаване на импулс е значително по-висока от кръговата честота на вълната и не може да бъде пренебрегната в израза за диелектричната проникваемост на плазмата (както обикновено се прави при ниски и междинни налягания). В повечето модели на повърхнинновълнов разряд при атмосферно налягане (с флуидни или кинетични части) отчитането на честотата на удари в електродинамиката става чрез въвеждане на фиксирана стойност на отношението  $\nu/\omega$ , която не се променя по дължината на плазмения стълб [89–92].

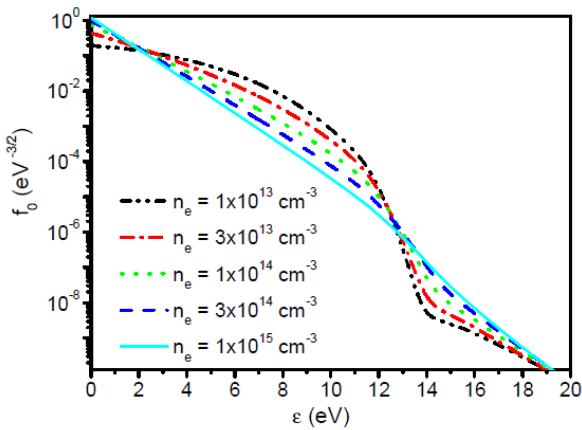
Изследване на вълновите и плазмените параметри на микровълнов разряд, създаван от електромагнитна вълна с помощта на самосъгласуван модел прави М. Atanasova [75]. Моделът е приложен за плазмен стълб в аргон при атмосферно налягане в две конфигурации: плазма–вакуум и плазма–диелектрик–вакуум. На фигура 2.26 е показано радиално разпределение на радиалната и аксиалната компонента на ЕМ вълна при наличие на диелектрик около плазмения стълб и за плазма, заобиколена от вакуум.



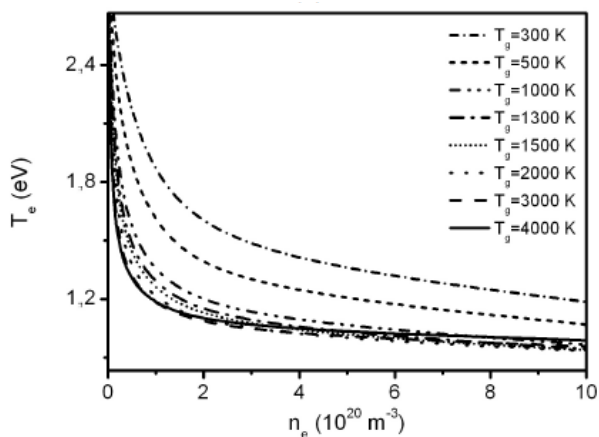


**Фиг. 2.26** Радиално разпределение на аксиалната (a) и радиалната (b) компонента на полето на повърхнината вълна за различни честоти на удари за плазма – вакуум (пунктирна линия) и плазма – диелектрик – вакуум (плътна линия) [75]

Моделът дава пълно описание на разпространението на електромагнитната вълна и плазмените параметри в зависимост от газоразрядните условия. От приложения самосъгласуван модел може да бъде получена функцията на разпределение на електроните по енергии за различни плазмени плътности. От фиг. 2.27 се вижда изменението на ФРЕЕ при различни електронни концентрации. На фиг. 2.28 е показана зависимостта на електронната температура от електронната плътност за различни газове температури.



**Фиг. 2.27** ФРЕЕ при различни електронни концентрации при газова температура 1000 K [75]



**Фиг. 2.28** Електронна температура при различна електронна концентрация за няколко газове температури [75]

Основният проблем на модела е, че се използва една и съща стойност на честотата на удари електрон–неутрал по целия плазмен стълб, зададена като външен параметър, а не полученото от кинетичната част разпределение на тази честота като функция на електронната концентрация, респективно аксиалната позиция.

### III. САМОСЪГЛАСУВАН МОДЕЛ НА ПОВЪРХНИННОВЪЛНОВ РАЗРЯД ПРИ АТМОСФЕРНО НАЛЯГАНЕ

При разглеждания вид плазма разпространяващата се повърхнинна електромагнитна вълна създава разряда. Така създадената плазма е част от вълноводната структура, по която вълната се разпространява. Тази физична картина на създаване и поддържане на плазма от повърхнинна електромагнитна вълна налага използването на самосъгласуван модел за описанието ѝ. Адекватният модел, описващ тази плазма, трябва да се основава на пълния набор уравнения, описващи едновременно електродинамиката на разпространението на електромагнитната вълна и кинетиката на електроните и тежките частици. Електродинамичната част на модела се базира на уравненията на Максвел. В кинетичната част се решава уравнението на Болцман за електроните и уравненията за баланс на частиците. Ролята на самосъгласувана връзка между двете части играят уравненията за баланс на енергията на вълната и баланс на енергията на електроните. При прилагане на модела за микровълнова плазма при атмосферно налягане е важно да бъде отчетена честотата на удари електрон–неутрал, която се получава от кинетиката. За разлика от случаите на ниско и междинно налягане за решаване на локалния дисперсионен закон при високо (атмосферно) налягане в самосъгласуваната връзка на модела се включва честотата на удари електрон–неутрал като функция на електронната концентрация. Този параметър като функция на електронната концентрация се получава от кинетичната част на модела.

#### 3.1 Електродинамична част

Електродинамичната част на модела описва разпространението на повърхнинна електромагнитна вълна, която поддържа плазмения стълб. Използването на различни възбудители (сърфатрон, сърфагайд, вълноводен сърфатрон и Ро-бокс) не влияе на описваните от модела процеси, което позволява прилагането му за различни експериментални устройства. Ъгловата честота  $\omega$  на тази вълна се приема за постоянна (това е възможно поради характеристиките на използваните възбудители). При изграждане на модела са направени предположения, че плазмата е в стационарно състояние и плазмената концентрация  $n$ , вълновото число  $k$  и амплитудата на вълната са слабо изменящи се функции на аксиалната координата  $z$ . Плазменият стълб е радиално и аксиално нехомогенен. Плазмената плътност, която използваме, е радиално осреднена. Компонентите на полето на азимутално симетрична повърхнинна вълна, представени в цилиндрични координати, са:

$$E = (E_r, 0, E_z)$$

$$B = (0, B_\varphi, 0).$$

Тази вълна се описва от уравненията на Максвел:

$$(3.1) \quad \begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \end{cases}$$

където векторът на електричната индукция  $\mathbf{D}$  е  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \int dt' \int d\mathbf{r}' \varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') \mathbf{E}(\mathbf{r}', t')$ . Високочестотната диелектричната проницаемост на плазма е:

$$(3.2) \quad \varepsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 + \frac{\nu^2}{\omega^2}\right)^{-1} + i \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 + \frac{\nu^2}{\omega^2}\right)^{-1}.$$

Тук  $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m}$ ,  $\nu = \nu_{\text{eff}}$  е ефективната честота на удари електрони–неутрала и  $n_e$  е електронната концентрация. Тъй като изразът (2) е комплексен, вълновото число също е комплексно. В разглеждания модел не се правят никакви приближения и диелектричната проницаемост на плазмата се използва в пълния ѝ вид, както е в израза (2). Честотата на удари се получава от кинетичната част на модела. За вакуума диелектричната проницаемост е  $\varepsilon_v = 1$ , а за диелектрика  $\varepsilon_d$ .

### 3.1.1 Вълново уравнение и компоненти на полето на вълната

Вълновите уравнения за компонентите на полето се получават от уравненията на Максвел в цилиндрични координати и имат следния вид (за  $E_z$ ):

$$(3.4) \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} E_z + \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_z + \left( \frac{\partial}{\partial z} \ln \varepsilon \right) \frac{\partial}{\partial z} E_z + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon E_z = 0.$$

Останалите компоненти на полето на вълната ( $E_r$  и  $B_\varphi$ ) в аксиално нехомогенен плазмен стълб се описват с аналогични уравнения. Решенията на вълновите уравнения могат да бъдат представени във вида:

$$(3.5) \quad \begin{aligned} E_{r,z}(r, z, t) &= \text{Re} \left[ (F_{r,z})(r, z) E(z) \exp(-i\omega t + i \int_0^z dz' k(z')) \right] \\ B_\varphi(r, z, t) &= \text{Re} \left[ G_\varphi(r, z) B(z) \exp(-i\omega t + i \int_0^z dz' k(z')) \right], \end{aligned}$$

където  $F_r$ ,  $F_z$ ,  $G_\varphi$  са безразмерни амплитудни функции,  $E(z) = B(z) \equiv E(R_p)$ , а  $k^0 = k_r + ik_i$  е комплексна величина, като  $k_r$  е вълновото число (коэффициент на разпространение на вълната) и  $k_i$  е коэффициент на затихване. Записано за аксиалната компонента на безразмерната амплитудна функция  $F_z$  вълновото уравнение има вида:

$$(3.6) \quad \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} - k^0 + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon + 2ik^0 \frac{\partial}{\partial z} \ln E + ik^0 \frac{\partial}{\partial z} \ln \varepsilon + i \frac{\partial k^0}{\partial z} + 2ik^0 \frac{\partial}{\partial z} \right) F_z(r, z) = 0.$$

С въвеждането на безразмерни величини – координата  $\rho = r/R$  и плазмения параметър  $\sigma = \omega R/c$ , получаваме вълновото уравнение в нулево приближение по отношение на  $\frac{1}{k^0} \frac{\partial}{\partial z} (\ln E)$ ,  $\frac{1}{k^0} \frac{\partial}{\partial z} (\ln \varepsilon)$  и  $\frac{1}{k^0} \frac{\partial}{\partial z} (\ln k^0)$ :

$$(3.7) \quad \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \sigma^2 \varepsilon - \mathcal{K}^0 \right] F_z(\rho) = 0,$$

където  $\mathcal{K}^0 = k^0 R_p$  е безразмерното комплексно вълново число. Решенията на вълновото уравнение в различните среди ( $p$  – плазма,  $d$  – диелектрик и  $v$  – вакуум) имат вида:

$$(3.8) \quad \begin{aligned} F_z^p(\rho) &= C_1 I_0(a_p \rho) & G_\varphi^p(\rho) &= -i \frac{\sigma \mathcal{E}_p^0}{a_p} C_1 I_1(a_p \rho) \\ F_z^d(\rho) &= C_2 J_0(a_d \rho) + C_3 H_0^{(1)}(a_d \rho) & G_\varphi^d(\rho) &= -i \frac{\sigma \mathcal{E}_d}{a_d} [C_2 J_1(a_d \rho) + C_3 H_1^{(1)}(a_d \rho)] \\ F_z^v(\rho) &= C_4 K_0(a_v \rho) & G_\varphi^v(\rho) &= i \frac{\sigma}{a_v} C_4 K_1(a_v \rho) \end{aligned}$$

Тук  $J_0$  и  $J_1$  са Беселови функции,  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$  и  $K_1$  са модифицирани функции на Бесел, а  $H_0^{(1)}$ ,  $H_1^{(1)}$  – функциите на Ханкел съответно от нулев и първи порядък. В тези изрази са използвани означенията  $a_p^2 = \mathcal{K}^0 - \sigma^2 \varepsilon_p$  за плазмената среда,  $a_d = (\sigma^2 \varepsilon_d - \mathcal{K}^0)^{1/2}$  за диелектрика и  $a_v^2 = \mathcal{K}^0 - \sigma^2$  за вакуума.

### 3.1.2 Локален дисперсионен закон

Прилагаме граничните условия за непрекъснатост на тангенциалните компоненти на полето на границите и нормираме на 1 амплитудната функция  $F_z$  на границата на плазмата. За случая на плазма, заобиколена от вакуум, граничните условия са:

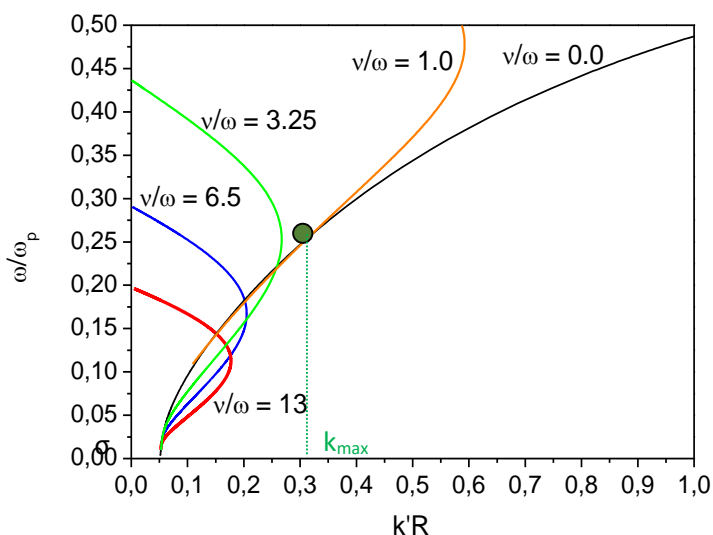
$$(3.9) \quad F_z^p(\rho) = F_z^v(\rho) \equiv 1 \quad F_\varphi^p = F_\varphi^v \quad \text{при} \quad r = R_p$$

От наложените гранични условия се получава система от пет уравнения, които позволяват да се определят константите  $C_1, C_2, C_3, C_4$  в решенията на вълновото уравнение и да се получи локалният дисперсионен закон.

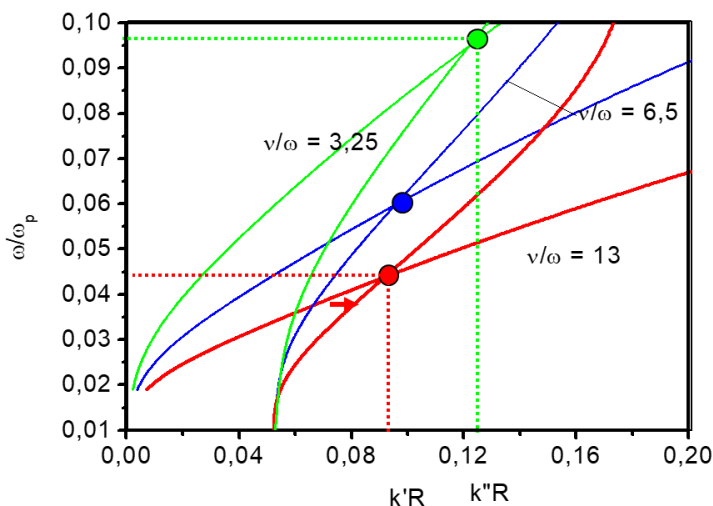
Общият вид на локалният дисперсионен закон е:

$$(3.12) \quad D(\omega, R_p, \omega_p(\varepsilon_p), \varepsilon_d, \gamma, k_r, k_i) = 0.$$

В локалното дисперсионно уравнение се получава зависимостта на електронната концентрация от комплексното вълново число  $k^{\text{ж}}$  чрез аргументите на Беселовите функции  $a_p, a_d$  и  $a_v$ . В случая на аксиално хомогенна плазма ( $\omega_p = \text{const}$ ) от дисперсионното уравнение се получава зависимостта на  $\omega$  от  $k_r R_p$ , която се представя във вида  $\omega/\omega_p$  от  $k_r R_p$  и се нарича дисперсионна диаграма, както и на  $\omega/\omega_p$  от  $k_i R_p$  – диаграма на декремента на затихване. Когато плазмата е нехомогенна и вълновата честота е постоянна ( $\omega = \text{const}$ ), променливите в дисперсионното уравнение са плазмената честота  $\omega_p$  и вълновото число  $k^{\text{ж}}$ . Това е причината дисперсионното уравнение за нехомогенна плазма да се нарича локално. Налага се то да бъде решавано във всяка точка от плазменния стълб. Така получаваме зависимост между локалната електронна концентрация (съответната плазмена честота  $\omega_p$ ) и реалната и имагинерна част на вълновото число. Тези зависимости се представят във вида  $\omega/\omega_p$  от  $k_r R_p$  и  $\omega/\omega_p$  от  $k_i R_p$  и се наричат съответно фазова диаграма и диаграма на декремента на затихване.



**Фиг. 3.1 б** Фазови диаграми при фиксирани стойности на  $v/\omega$  [77]



**Фиг. 3.1 в** Фазови диаграми и коефициенти на затихване при същите условия като фигура 3.1 б [77]

Всички фазови диаграми с  $v/\omega \geq 1$  имат **точка на обръщане**, която се дължи на отчитането на честотата на удари в диелектричната проницаемост на плазмата [77, 78] (фиг. 3.1 б). Частта от фазовите криви след точката на обръщане съответства на област на обратна вълна, която не може да поддържа плазма. В областта на права вълна стойностите на  $\omega/\omega_p$  са малки и растат с нарастване на вълновото число, т.е. имаме плътна плазма, чиято плътност намалява с вълновото число до точката на обръщане. Съществуването на точка на обръщане означава, че за всяка фазова крива вълновото число има максимална стойност  $k_{\max}$ . Освен това, при  $\omega/\omega_p \rightarrow 0$  вълновото число  $k \rightarrow \sigma$  като остава по-голямо от  $\sigma$ . Плазменият параметър  $\sigma$  се определя от радиуса на плазмения стълб и честотата на вълната. Това означава, че в областта на фазовата диаграма, съответстваща на реални плазмени стълбове, вълновото число е ограничено между  $\sigma$  и  $k_{\max}$ , т.е.  $\sigma < k < k_{\max}$ . Според Moisan [79] точката на обръщане съответства на края на плазмения стълб. С увеличаване на плазмения радиус, съответно на  $\sigma$ , фазовите диаграми се отместват надясно при малките  $\omega/\omega_p$  и този ефект е силно изразен. При големите  $\omega/\omega_p$  в областта на обратна вълна всички фазови диаграми клонят към една и съща стойност. Коефициентите на затихване пресичат съответните фазови криви в точка (**точка на пресичане**, фиг. 3.1. в), която според нашия модел е истинският край на плазмения стълб. При една и съща електронна концентрация (фиксирано  $\omega/\omega_p$ ) преди точката на пресичане вълновото число  $k_r$  е по-голямо от коефициента на затихване  $k_i$ . Такава вълна може да създава и поддържа плазма. След точката на пресичане коефициентът на затихване  $k_i$  става по-голям от коефициента на разпространение  $k_r$  и вълната не може да поддържа плазмата.

### 3.1.3 Уравнение за баланс на енергията на вълната

Уравнението за баланса на енергията на вълната дава връзката между изменението на вълновата енергия по посока на разпространение на вълната и абсорбираната в плазмата мощност на единица дължина от разряда. То може да бъде получено от теоремата на Пойнтинг и има вида:

$$(3.13) \quad \frac{d}{dz} S = -Q,$$

където  $S$  е потокът на енергията на вълната. Тя е сума от аксиалните компоненти на вектора на Пойнтинг  $S_z = \frac{c}{8\pi} \text{Re}(E_r^* B_\phi)$ , осреднени по периода на вълната и интегрирани от оста на разряда до безкрайност в равнина, нормална на плазмения стълб:

$$(3.14) \quad S = 2\pi \int_0^R r S_z^p dr + 2\pi \int_R^{R_d} r S_z^d dr + 2\pi \int_{R_d}^{\infty} r S_z^v dr.$$

Енергията, която електроните абсорбират от вълната на единица дължина е:

$$(3.15) \quad Q(z) = 2\pi \int_0^R dr r \langle \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \rangle = \frac{\omega}{4} \text{Im}(\epsilon) E^2 \int_0^1 dr r \left( |F_r^p|^2 + |F_z^p|^2 \right).$$

За абсорбираната от вълната мощност получаваме:

$$(3.16) \quad Q = \frac{\omega}{4} \text{Im}(\epsilon_p) R^2 E^2 \frac{1}{a_p^{*2} - a_p^2} k_0^2 R^2 \left( \frac{1}{a_p} \frac{I_1(a_p)}{I_0(a_p)} - \frac{1}{a_p^*} \frac{I_1(a_p^*)}{I_0(a_p^*)} \right) + a_p^* \frac{I_1(a_p^*)}{I_0(a_p^*)} - a_p \frac{I_1(a_p)}{I_0(a_p)}.$$

От електродинамичната част на модела, решавайки локалния дисперсионен закон и уравнението за баланс на енергията на повърхнинната вълна, могат да бъдат получени аксиалните профили на електронната концентрация, комплексното вълново число, вълновата мощност, поддържаща разряда, абсорбираната от електроните мощност на единица дължина и компонентите на полето. За да се направи това е необходимо да знаем как електроните изразходват енергията, получена от вълната, за да получим още едно уравнение за връзката между  $Q$  и плазмената плътност. Това се постига в кинетичната част на модела. За решаване на локалния дисперсионен закон е необходима честотата на удари електрон–неутрал, която също се получава от кинетиката.

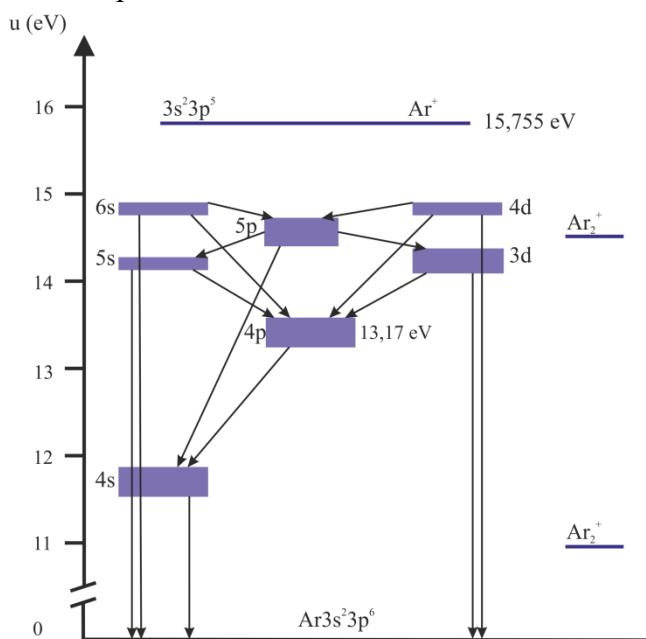
## 3.2 Кинетична част

Кинетичната част на модела разглежда аргонна плазма като отчита наличието на аргонни атоми в основно и възбудено състояние, аргонен димер, атомни и молекулни аргонни йони и електрони. Поради това тя се разделя на две части – кинетика на електроните и кинетика на тежките частици на аргонна плазма.

### 3.2.1 Схемата на енергетичните нива и елементарни процеси в плазмата

Схемата на енергетичните нива в модела се избира в зависимост от газоразрядните условия. При атмосферно налягане честотата на удари е по-висока, което изисква включването на по-голям брой нива. Схемата на енергетичните нива на аргона, която е използвана в този модел, е показана на фиг. 3.2. Възбудените състояния са представени като блокове от нива с ефективна енергия в блока

$E_j = \sum_{l=1}^m E_{j,l} / m$ , където  $E_{j,l}$  е енергията на всяко ниво  $l$  в блок  $j$ , отчетена от основното ниво, а  $m$  е общият брой на нивата в блока.



Фиг. 3.2 Енергетична диаграма на аргонен атом, атомен и молекулярен йон и аргонна молекула

Когато описваме плазма при атмосферно налягане в електронната кинетика трябва да бъдат включени голям брой елементарни процеси. Отчитат се процесите, които водят до създаване и загуба на заредени частици и процесите, при които има обмен на енергия. При високо налягане доминират процесите на стъпалната йонизация и възбуждане, а до загуба на заредени частици води предимно рекомбинацията. Включените в модела процеси са представени в Таблица 1 на дисертацията, а използваните за пресмятанията сечения и константи могат да бъдат намерени в ПРИЛОЖЕНИЕ 1 на дисертацията.

### 3.2.2 Кинетика на електроните

В електронната кинетика се решава уравнението на Болцман, от което се получава функцията на разпределение на електроните по енергии. ФРЕЕ е необходима за пресмятане на транспортните коефициенти и скоростните константи на елементарните процеси, както и ефективната честота на удари електрон–неутрал с предаване на импулс  $v_{eff}$ .

#### 3.2.2.1 Уравнение на Болцман

Когато честотата на вълната е по-голяма от честотата за енергетична релаксация на електроните по енергия (условие за стационарност на Winkler [80]) ФРЕЕ може да се счита за постоянна във времето. Стационарното уравнение на Болцман за електроните има решение, което може да се представи като разложение по полиноми на Лежандр от втори ред. Хомогенното уравнение на Болцман може да се запише в следния вид [81]:

$$(3.17) \quad \frac{dF}{du} = -\sum_j (u+U_j^{exc}) N_j Q_j^{exc} (u+U_j^{exc}) f_0(u+U_j^{exc}) - 4 \sum_{i=0}^5 (2u+U_i^{ion}) N_i Q_i^{ion} (2u+U_i^{ion}) f_0(2u+U_i^{ion})$$

където  $F$  е пълният електронен поток в енергетичното пространство и представлява сума от потоците, дължащи се на приложеното електрично поле на вълната и на еластичните и нееластични удари. Освен това в него са включени и членове, отчитащи дифузията, различните видове рекомбинация, както и Пенинговата и асоциативната йонизации.  $N_j$  е заселеността на долното ниво за всеки от процесите на възбуждане,  $Q_j^{exc}$  и  $U_j^{exc}$  са сечението на ударите и праговата енергия.  $N_i$  е заселеността на нивото от което се извършва йонизацията,  $Q_i^{ion}$  и  $U_i^{ion}$  са сечението за ударите и праговата енергия за йонизация. При високи енергии  $u \rightarrow \infty$  ФРЕЕ става пренебрежимо малка и условието  $f_0(u_\infty) = 0$  се използва като гранично условие.

### 3.2.2.2 Функция на разпределение на електроните по енергии

ФРЕЕ се дефинира на основата на функцията на разпределение на електроните по скорости (ФРЕС)  $F(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ , която описва концентрацията на частиците във фазовото пространство:

$$(3.18) \quad d^6 N \equiv F(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{v}.$$

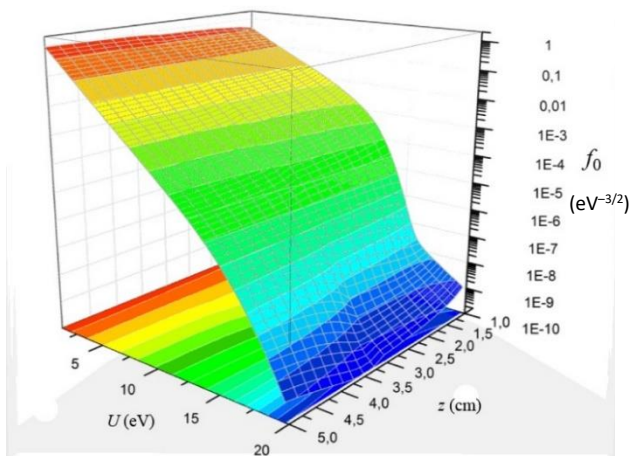
Връзката между двете е:

$$(3.19) \quad F_0 = n(r) \cdot f_0(u)$$

като  $f_0$  е нормирана на единица:

$$(3.20) \quad \int_0^\infty f_0(u) u^{1/2} du = 1.$$

Получената от уравнението на Болцман ФРЕЕ се използва за пресмятането на скоростните константи на процесите, както и на ефективната честота на удари  $\nu_{eff}$ . Тя удовлетворява уравненията за баланс на енергията и уравненията за баланс на частиците за електрони и тежки частици. Получената ФРЕЕ (фиг. 3.3) не е Максвелова и се изменя по дължината на стълба.



Фиг. 3.3 Функция на разпределение на електроните по енергии

В кинетика на електроните се решава също и уравнението за баланс на енергията на електроните, което дава средната мощност за създаване на електрон-йонна двойка в разряда  $\theta$ . Тя може да бъде получена като умножим уравнението на Болцман по кинетичната енергия на електроните и го интегрираме в цялото енергетично пространство.

$$(3.21) \quad \theta = \frac{2m}{M} \langle u v^{ea} \rangle + \frac{2m}{M_{N^+}} \langle u v^{ei} \rangle + \frac{2m}{M_{N_2^+}} \langle u v^{eii} \rangle + \sum_{i=0}^k \sum_{j=1}^k (v_{ij}^{exc} - v_{ji}^{deexc}) u_{ij}^{exc} + \sum_{i=0}^k v_i^{ion} u_i^{ion} + v^{diff} \langle u \rangle + v^{rec} \langle u \rangle - \sum_m \frac{k_m^{Pen} N_m^*}{n_e} u_m^{Pen}$$

Средната мощност за създаване на електрон-йонна двойка участва в самосъгласуваната връзка между кинетиката и електродинамиката.

Уравнението за баланс на частиците, приложено за електроните има следния вид:

$$(3.22) \quad \sum_{i=0}^k k_i^* N_i^* + \sum_m k_m^{\text{Pen}} N_m^* - v_e^{\text{diff}} n_e - \alpha^{\text{diss}} n_e N_2^+ - \alpha^{\text{ei}} n_e N^+ - \alpha^{\text{ee}} n_e^2 N^+ - \alpha^{\text{ea}} n_e N N^+ = 0.$$

В това уравнение членовете със знак "+" водят до създаване на електрони, а тези със знак "-" до загуба на електрони.

### 3.2.3 Кинетика на тежките частици

Кинетиката на атомите и йоните се описва от система балансни уравнения за възбудените атоми, атомните и молекулните йони, от които се определят концентрациите на съответните частици при зададени електронна концентрация, средна енергия на електроните и ФРЕЕ. Аргоновият атом е представен като частица с енергетична структура, показана на фиг. 3.2.

Елементарните процеси (пряка и стъпална йонизация, пряко и стъпално възбуждане и девъзбуждане с електронен удар, радиационни преходи с отчетено пленяване на излъчването и др.), включени в балансните уравнения, са представени в Таблица 1. За пресмятане на скоростните константи са използвани литературни данни (ПРИЛОЖЕНИЕ 1) за сечения, интегрирани с пресметнатите ФРЕЕ във всяка точка по дължината на плазмения стълб.

### 3.3 Самосъгласувана връзка

За получаването на самосъгласуван модел на повърхнинновълновия разряд кинетичната и електродинамичната части на модела трябва да бъдат свързани посредством величините, които участват и в двете части. Като се има предвид, че плазмата е аксиално нехомогенна, всички тези величини зависят от електронната концентрация и съответно от аксиалното положение. На фиг. 3.4 схематично са представени основните уравнения и получаваните величини от всяка от двете части на модела.

Самосъгласуваната връзка се осъществява чрез две процедури, респ. чрез две величини: (1) баланса на енергията, съответно средната мощност за създаване на двойка електрон-йон в разряда  $\theta$  и (2) честотата на удари електрон-неутрал с предаване на импулс  $v_{\text{eff}}$ . Тези две величини се получават в кинетичната част като функции на електронната концентрация.

Балансът на енергията се отнася за енергията на вълната и енергията на електроните.



**Фиг. 3.4** Схема на основните уравнения, самосъгласуваната връзка на кинетичната и електродинамичната части на модела



Енергията, която вълната губи при разпространението си, е равна на вълновата енергия, абсорбирана от електроните. Това е уравнението за баланс на енергията на вълната и се получава от електродинамиката:

$$(3.23) \quad \frac{d}{dz} S = -Q.$$

Уравнението за баланс на енергията на електроните, пресметнато от кинетиката, дава изразходваната в елементарните процеси енергия  $\theta$ :

$$(3.24) \quad \theta = \frac{2m}{M} \langle uv^{ea} \rangle + \frac{2m}{M_{N^+}} \langle uv_{N^+}^{ei} \rangle + \frac{2m}{M_{N_2^+}} \langle uv_{N_2^+}^{ei} \rangle + \sum_{i=0}^k \sum_{j=1}^k (v_{ij}^{exc} - v_{ji}^{deexc}) u_{ij}^{exc} + \sum_{i=0}^k v_i^{ion} u_i^{ion} + v^{diff} \langle u \rangle + v^{rec} \langle u \rangle - \sum_m \frac{k_m^{Pen} N_m^{*Pen}}{n_e} u_m^{Pen}$$

Получената от вълната енергия  $Q$  електроните използват за осъществяване на елементарните процеси, което дава връзката между кинетичната и електродинамичната част на модела:

$$(3.25) \quad Q = \pi R^2 n_e \theta.$$

Честотата на удари електрон–неутрал с предаване на импулс участва в диелектричната проницаемост на плазмата:

$$(3.26) \quad \varepsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + iv)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( 1 + \frac{v^2}{\omega^2} \right)^{-1} + i \frac{v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( 1 + \frac{v^2}{\omega^2} \right)^{-1}.$$

От тук тя се включва в локалното дисперсионно уравнение. Тя се пресмята в кинетичната част на модела като

$$(3.27) \quad v_{eff} = \int_0^\infty \frac{v_c u^{3/2}}{v_c^2 + \omega^2} \frac{df^0}{du} du / \int_0^\infty \frac{u^{3/2}}{v_c^2 + \omega^2} \frac{df^0}{du} du.$$

Едновременното решаване на уравнението за баланс на енергия на електроните, уравнението за баланс на енергията на вълната и локалния дисперсионен закон със съответната зависимост на честотата на удари от електронната концентрация ни позволява да получим аксиалното разпределение на всички плазмени и вълнови параметри.

### 3.4 Числени пресмятания

Съвместното решаване на кинетичните и електродинамичните уравнения е направено числено във всяка точка по дължината на плазмения стълб, следвайки показаната блок-схема на програмта. Като входни параметри са използвани величини, характеризиращи разрядните условия (радиуси на плазмата и разрядната тръба, диелектрична проницаемост на тръбата, честота на електромагнитната вълна и налягане) и величини, свързани с елементарните процеси (сечения за взаимодействия, скоростни константи, коефициенти на подвижност и дифузия).

Решаването на уравненията в кинетичната част дава зависимостите на ФРЕЕ, средната енергия на електроните, заселеностите на възбудените състояния, концентрацията на атомните и молекулните йони, средната енергия за създаване на електрон–йонна двойка в разряда  $\theta$ , ефективната честота на удари електрон–неутрал с предаване на импулс  $v_{eff}$  от електронната концентрация. В електродинамичната част се решава дисперсионното уравнение и уравнението за баланс на енергията на вълната, като се използват получените от кинетиката стойности на  $\theta$  и  $v_{eff}$  за всяка точка по дължината на плазмения стълб. Получават се фазови криви и диаграми на коефициента на затихване при различни разрядни условия, както и аксиални профили на електронната концентрация (а оттам и на всички величини, пресметнати в кинетиката), вълновото число и вълновата мощност.

## IV. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛИРАНЕТО

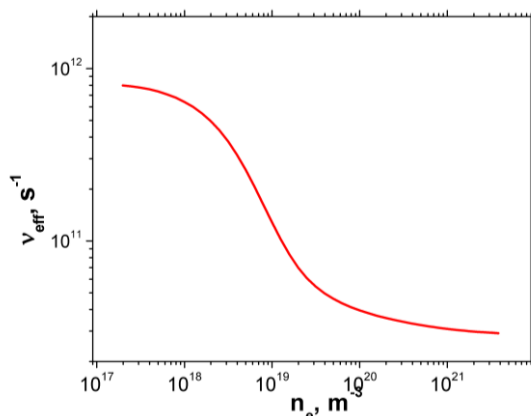
### 4.1 Кинетика на елементарните процеси и на атомите и йоните

При повърхнинновълновите разряди при атмосферно налягане функцията на разпределение на електроните по енергии не е Максвелова и се изменя с разрядните условия и по дължината на плазмения стълб. За получаване на скоростните константи на елементарните процеси и ефективната честота на удари електрони–неутрали с предаване на импулс е необходимо интегриране на съответните сечения на процесите с конкретната ФРЕЕ във всяка точка по дължината на плазмата. ФРЕЕ се изменя заедно с плазмената плътност по дължината на стълба. Пресметната е ФРЕЕ за електронни концентрации в интервала от  $1.10^9 \text{ cm}^{-3}$  до  $3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . ФРЕЕ силно се различава от Максвелова особено при ниски плазмени плътности – под  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , което е близо до края на плазмения стълб.

В тази част от резултатите са представени скоростните коефициенти за директна и стъпална йонизация и възбуждане, честотата на удари електрони–неутрали с предаване на импулс, заселеността на възбудените нива на аргона и концентрацията на йоните като функция на електронната концентрация. Представена е честотата на удари електрони–неутрали с предаване на импулс като функция на електронната концентрация, получена за различни честоти на вълната и плазмени радиуси.

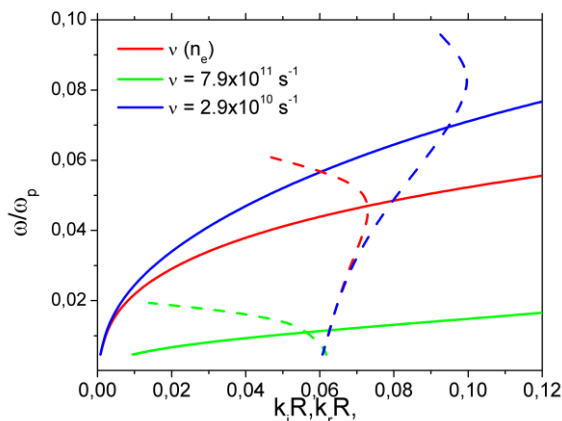
### 4.2 Изследване на ефекта на самосъгласуваната връзка честота на удари електрони–неутрал с предаване на импулс върху резултатите от модела

На фигура 4.11 е показана зависимостта, получена от кинетичната част на модела, на честотата на удари електрон–неутрал с предаване на импулс, както функция на електронната концентрация. Пресметната е за следните газоразрядни условия: вътрешен радиус на тръбата 1 mm, външен радиус 3 mm и честота на вълната 2,45 GHz. Както се вижда, съществено е изменението на честотата на удари с електронната концентрация и съответно по дължината на плазмения стълб. Получената зависимост показва, че с намаляване на електронната концентрация честотата на удари расте. Изменението в този случай варира от  $\nu = 2,9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$  при  $n_e = 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  до  $\nu = 7,9 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$  при  $n_e = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ .



**Фиг. 4.11** Честота на удари електрони–неутрали при фиксирана честота 2.45 GHz,  $R_{in} = 1 \text{ mm}$ ,  $R_{out} = 3.5 \text{ mm}$

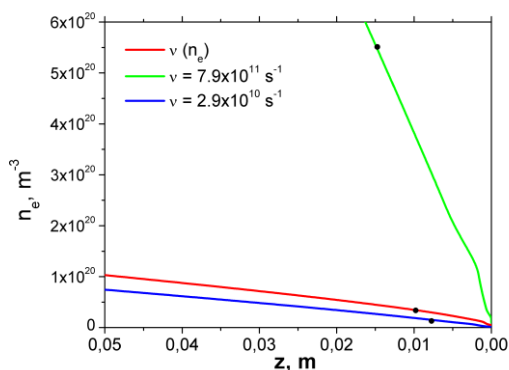
Добре изразеното изменение на честотата на удари като функция на електронната концентрация показва, че използваният досега подход от редица автори [75, 89–92] за решаване на дисперсионното уравнение с фиксирана стойност на отношението  $\nu/\omega$  в диелектричната проницаемост на плазмата може да доведе до съществени отклонения в резултатите от моделирането. Необходимо е за всяка точка по дължината на плазмения стълб при пресмятане на диелектричната проницаемост на плазмата в електродинамичната част да се използва съответната честота на удари, която отговаря на електронната концентрация в точката. На фигура 4.12 е направено сравнение на вълновите характеристики – фазови диаграми и диаграми на коефициента на затихване при отчитане на изменението на честотата на удари  $\nu(n_e)$  и за две фиксирани гранични стойности.



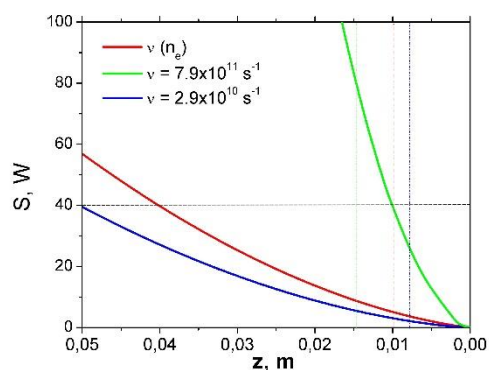
**Фиг. 4.12** Фазови диаграми (прекъснати линии) и диаграми на коефициента на затихване (пътни линии)

Червените криви се отнасят за случая с изменяща се по дължината на стълба честота на удари, а сините и зелените са за постоянно  $\nu$  съответно най-малката и най-голямата стойност на честотата на удари за електронни концентрации при възбудителя и в края на плазмения стълб. Във фазовите диаграми се наблюдава точка на обръщане, която се премества към по-малките вълнови числа и по-големите електронни концентрации при увеличаване на честотата. Точката на пресичане на фазовите криви и диаграмите на затихване, където според нас е истинският край на плазмения стълб, има същото поведение, т.е. при по-високи честоти на удари край на плазмения стълб е при по-високи електронни концентрации, докато при ниските честоти на удари електронната концентрация в края за стълба може да е на няколко порядъка по-ниска.

На фигура 4.13 са представени аксиалните профили на плазмената плътност при същите условия като на фигура 4.12. Вижда се, че плазмената плътност силно зависи от честотата на удари при фиксирани газоразрядни условия. При по-високата честота тя и аксиалният ѝ градиент са по-големи. Тук черните точки съответстват на края на плазмения стълб, отговарящ на пресечната точка на фазовите диаграми и диаграмите на коефициента на затихване. От фигура 4.12 се вижда, че при неотчитане на  $\nu(n_e)$  и приемайки я за равна на по-голямата гранична стойност (зелената крива), край на плазмения стълб е при много по-висока електронна концентрация, с около един порядък над тази при  $\nu(n_e)$  (червената крива). Аксиалният градиент също е значително по-голям при  $\nu = 7.9 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ . На фигура 4.14 са представени аксиалните профили на вълновата мощност за трите случая. Вижда се, че при високата фиксирана честота на удари е необходима значително по-висока вълнова мощност за поддържане на плазмения стълб от получената с  $\nu(n_e)$ . Ако фиксираме вълновата мощност напр. на 40 W, бихме получили стълб с дължина 3.0 cm при отчитане на  $\nu(n_e)$ , дължина на стълба 4.2 cm при малката фиксирана стойност на честотата, а при високата фиксирана стойност на честотата тази мощност изобщо не би била достатъчна за създаване на плазма.



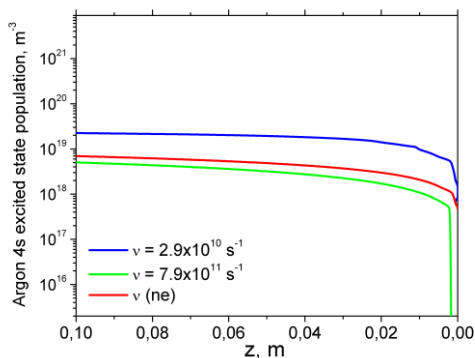
**Фиг. 4.13** Аксиални профили на електронната концентрация



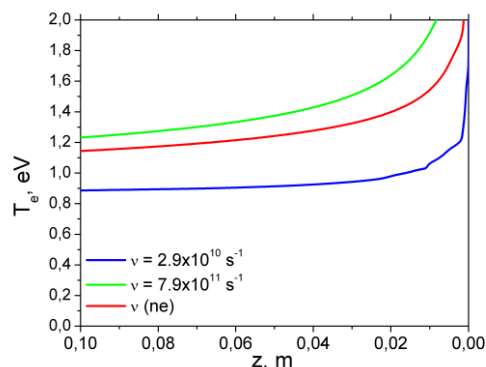
**Фиг. 4.14** Аксиални профили на вълновата мощност

Получените резултати показват огромната грешка, която се получава, ако не се вземе предвид изменението на честотата на удари електрон-неутрал с предаване на импулс по дължината на плазмения

стълб. Различия се получават и в аксиалните профили на заселеностите на възбудените състояния на аргона (фиг. 4.15), на концентрацията на аргоновия йон  $Ar^+$ , молекулярните йони  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$  и електронната температура (фиг. 4.19). Трябва да отбележим, че за тази силно неравновесна плазма с не-Максуелова ФРЕЕ, електронната температура  $T_e$  е дефинирана като  $2/3$  от средната енергия на електроните, пресметната от ФРЕЕ. Интересно поведение се наблюдава при аксиални профили на концентрацията на молекулярните йони  $Ar_3^+$ . В случая на фиксирана честота на удари, по-малка от истинската, кривата има различно поведение от другите два случая. Концентрацията на йоните  $Ar_3^+$  е по-ниска от истинската близо до възбудителя и расте към края на стълба, докато при отчитане на зависимостта  $\nu(n_e)$  концентрацията на тези йони намалява от възбудителя към края на стълба.



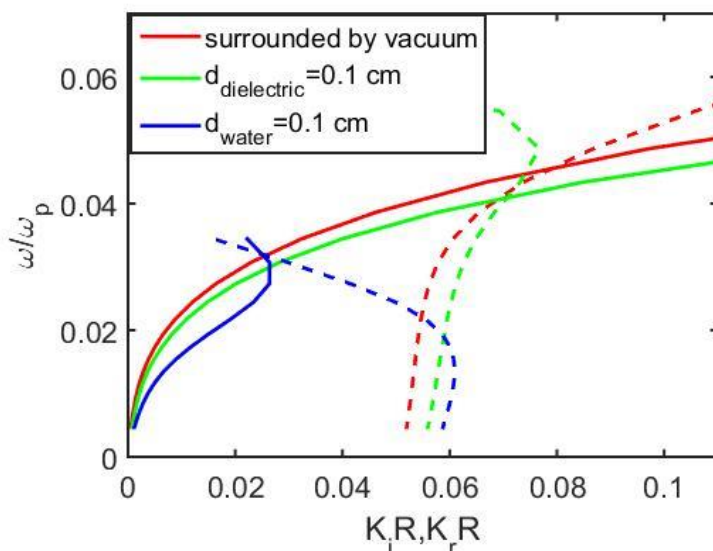
**Фиг. 4.15** Аксиалните профили на концентрациите на възбудените нива  $4s$  (ляво) и  $5p$  (дясно)

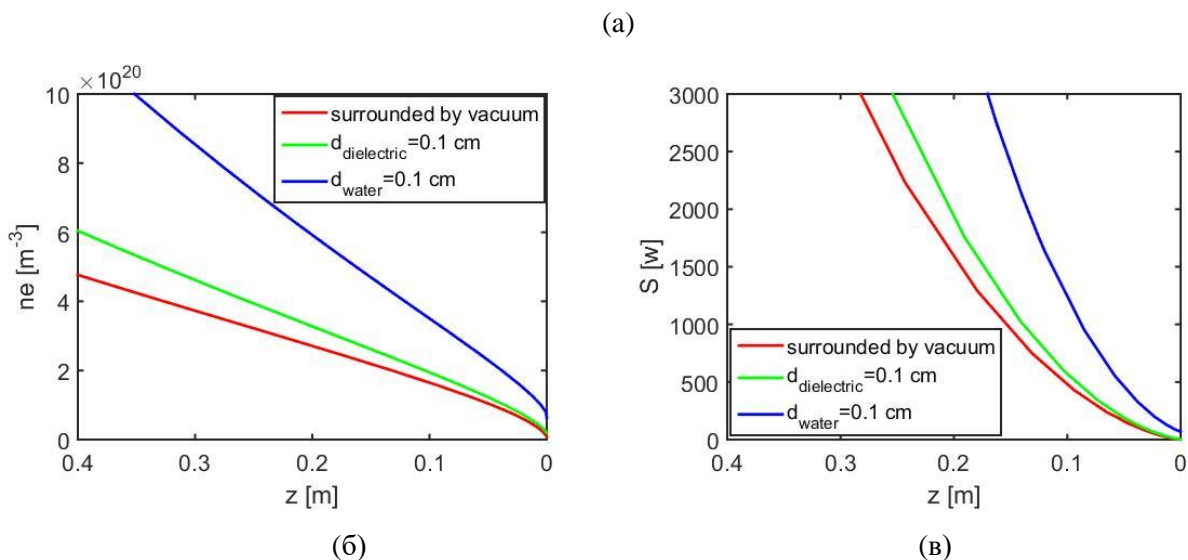


**Фиг. 4.19** Аксиални профили на електронната температура

### 4.3 Влияние на заобикалящата плазмата среда върху вълновите и плазмените характеристики

На базата на създадения самосъгласуван модел на плазма, поддържана от бягаща електромагнитна вълна в аргон при атмосферно налягане, е направено теоретично изследване на характеристиките на плазмата и поддържащата я вълна в зависимост от заобикалящата я среда. Избраните за изследване среди са вакуум, диелектрична кварцова тръба и вода. На фигура 4.20 с червено е представена конфигурацията плазма–вакуум, със зелено плазма–диелектрик–вакуум, като тръбата е с диелектрична проникваемост  $\epsilon_d = 3,8$  и в синьо плазма–вода–вакуум, като при честота  $2.45 \text{ GHz}$  относителната диелектрична проникваемост на водата е  $\epsilon_d = 80$ . Представените резултати показват, че в случая плазма–вода–вакуум точката на пресичане на коефициента на разпространение и на коефициента на затихване се намира при по-малките вълнови числа и по-големите електронни концентрации в сравнение с другите две конфигурации. При наличие на вода краят на плазмения стълб е при по-високи електронни концентрации, докато в случая плазма–вакуум електронната концентрация в края за стълба може да е на няколко порядъка по-ниска (фиг. 4.20, дясно).





**Фиг. 4.20** Фазови диаграми и диаграми на коефициента на затихване (а) електронна концентрация (б) и вълнова мощност (в) за конфигурации плазма–вакуум, плазма–диелектрик–вакуум ( $\epsilon_d = 3.8$ ) и плазма–вода–вакуум ( $\epsilon_d = 80$ ), радиус на плазмата  $R = 0.1$  cm

## V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА МИКРОВЪЛНОВ ПЛАЗМЕН ФАКЕЛ С ТЕЧНОСТИ

### 5.1. Плазмен източник и експериментални методи

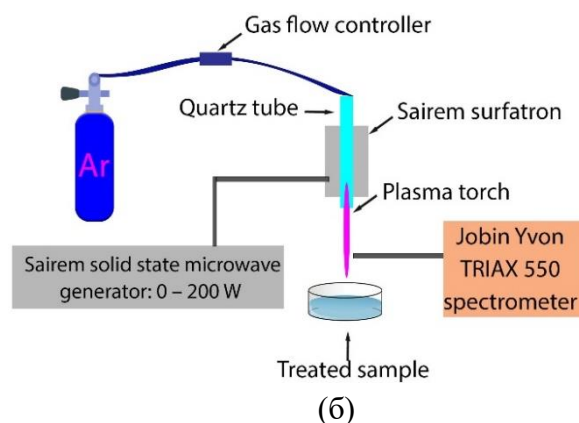
Изследванията са проведени в сътрудничество с:

- екипа на проф. Франтишек Кръчма от Техническия университет в Бърно, Чехия – изследване на взаимодействие на микровълнов плазма с вода;
- екипа на проф. Яна Топалова от Катедрата по Обща и приложна хидробиология, Биологически факултет, СУ “Св. Климент Охридски” – изследвания върху бактерицидния ефект на микровълнов плазмен факел и илазмено третиране на моделни води.

Аргоновият плазмен факел в нашата лаборатория се получава с помощта на повърхнинна електромагнитна, възбуждана от устройство тип сърфатрон. Плазмата се възбужда в газоразрядна тръба, като част от нея излиза извън тръбата в отвореното пространство – плазмен факел. По този начин плазмата може да бъде в контакт с третираните обекти (в случая течности и биологични системи) и да взаимодейства с тях (фиг. 5.1 а).



(a)



(б)

**Фиг. 5.1** Повърхнинновълнов разряд в аргон при атмосферно налягане, създаван от плазмен възбудител тип сърфатрон – в отворено пространство (плазмен факел) общ изглед (а) и схема на експерименталното устройство (б).

При взаимодействие на плазма с течности едновременно са наблюдават два ефекта, които са обект на изследване: изменение на плазмените характеристика и модифициране на свойствата на водата.

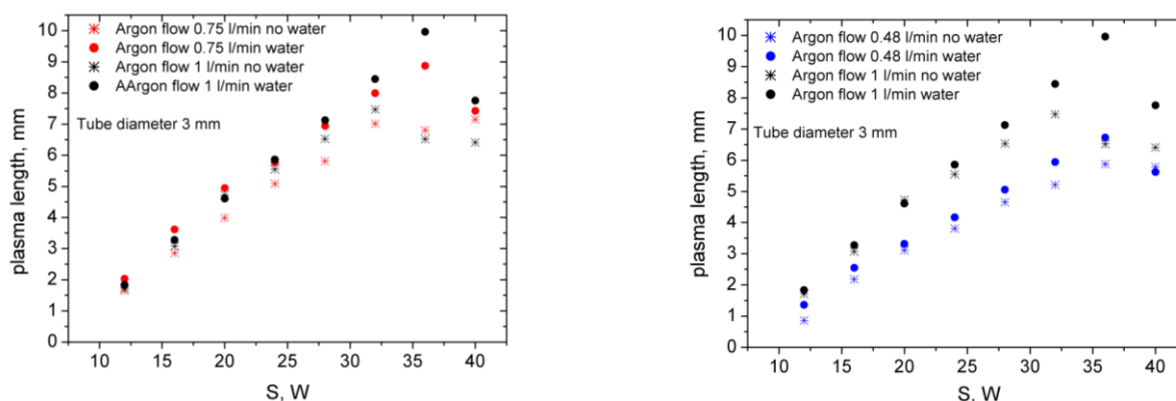
## 5.2. Изменение на плазмените характеристики при взаимодействие на плазмения факел с дестилирана вода

Вода, поставена непосредствено под плазмения стълб, променя неговите геометрични размери. При ниската вълнова мощност, с която работим, и имайки предвид високата относителна диелектрична проникваемост на водата при честота на вълната 2.45 GHz ( $\epsilon_B \approx 80$ ) плазменият факел не прониква във водата.

Наблюдаваните ефекти при това взаимодействие могат да бъдат разделени на три групи. Първият ефект, който може лесно да бъде наблюдаван при поставяне на вода под плазмения факел (така че плазмата да не допира водата), е промяна в дължината на плазмения стълб. Резултатите от това изследване са представени на поканен доклад на 7<sup>th</sup> International Workshop & Summer School on Plasma Physics и публикувани в Journal of Physics: Conference Series. При поставянето на водата на разстояние по-малко от дължината на плазмения факел могат да бъдат наблюдавани 2 различни случая: плазменият стълб да се плъзга по повърхостта на водата без да променя формата ѝ или плазмения факел да образува вдлъбнатина (вдлъбнат мениск) на повърхостта на водата. Част от тези резултати са получени и публикувани в рамките на COST 7 акция TD1208 в Plasma Medicine [69].

### 5.2.1. Промяна в дължината на плазмения стълб

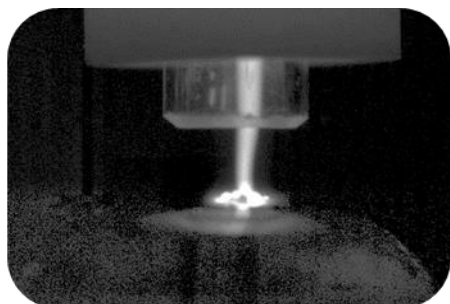
Експерименталното изследване показва как наличието на вода, поставена под плазмата на разстояние по-голямо от дължината на плазмения стълб, влияе на дължината му при различна вложена мощност. Дължината на плазмения стълб за мощности от 12 W до 40 W са измерени при наличие на вода и сравнени с дължината на плазмен стълб при същите газоразрядни условия, но без водата. Измерванията са проведени за различни газоразрядни условия (газов поток и плазмен радиус).



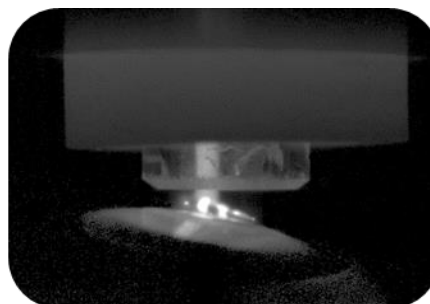
Фиг. 5.5 Дължина на плазмения факел в зависимост от вълновата мощност при отсъствие и наличие на вода под разряда

### 5.2.2. Взаимодействие на плазмата и водата при малък газов поток

При малък газов поток обикновено се наблюдава светло петно върху водната повърхност. Заснемането с високоскоростна камера в Техническия университет в Бърно показва, че всъщност по водната повърхност се плъзгат 3–4 пръстовидни плазмени структури, които се въртят и с просто око се наблюдават като светло петно. Освен това те имат своя собствена структура, забележима на показаната фигура 5.6 а, б.



(а) Диаметър на тръбата: 3 mm  
Газов поток: 0.4 l/min  
Мощност: 20 W

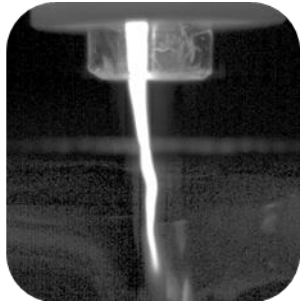


(б) Диаметър на тръбата: 2 mm  
Газов поток: 0.2 l/min  
Мощност: 20 W

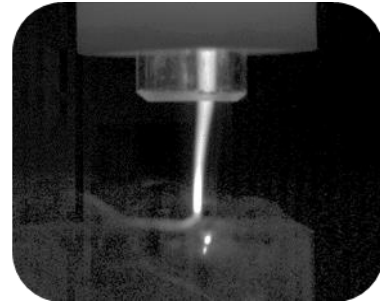
**Фиг. 5.6** Пръстовидни плазмени структури върху водната повърхност, заснети с високоскоростна камера при различни газоразрядни условия

### 5.2.3. Взаимодействие на плазмата и водата при голям газов поток

При увеличаване на газовия поток се наблюдава изкривяване на водната повърхност и се образува вдлъбнат мениск.



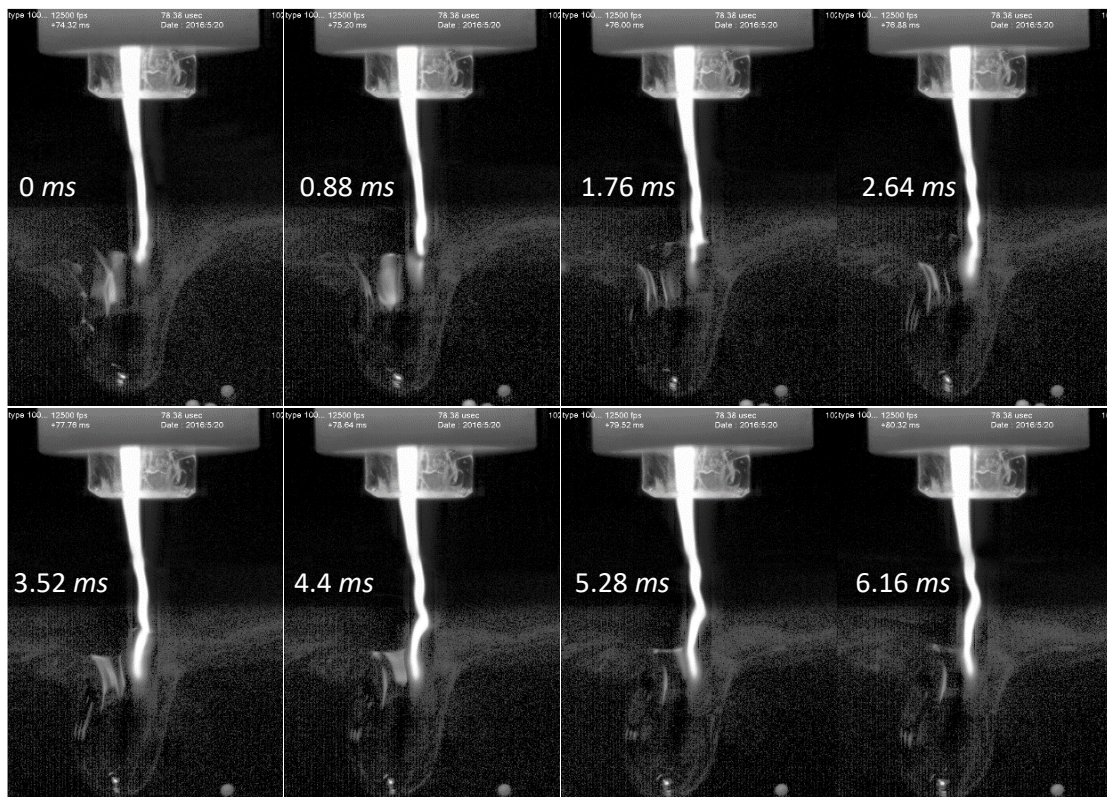
(а) Диаметър на тръбата: 2 mm  
Газов поток: 0.5 l/min  
Мощност: 20 W



(б) Диаметър на тръбата: 3 mm  
Газов поток: 1.0 l/min  
Мощност: 20 W

**Фиг. 5.7** Вдлъбнат мениск върху водната повърхност, заснети с високоскоростна камера при взаимодействие на плазмата с вода при различни.

При наблюдението със скоростна камера се забелязва изменение на формата на плазмения стълб при наличие на вълни по повърхността на водата (фиг. 5.7 а, б). При определени газоразрядни условия и когато плазмата е заобиколена от водния мениск тези вълни се предават на плазмения стълб и той извършва вълнообразни движения. На фигура 5.8 са показани последователни кадри от заснемането на плазмения факел от фигура 5.7 б в рамките на 6 ms. Тук лесно се забелязват вълните, разпространяващи се по плазмения стълб и следващи движението водната повърхност.



**Фиг. 5.8** Наблюдение със скоростна камера на взаимодействие на плазмата с вода

Независимо, че плазмата не прониква във водата, при тяхното взаимодействие се създават активни частици в течността. Направено е изследване на зависимостта на повлияната от плазмата площ от водната повърхност от разрядните условия, като предположението е, че при по-голяма площ на взаимодействие плазма–вода концентрацията на активните частици във водата е по-голяма.

Резултатите показват силна зависимост на размерите на мениска от вложената вълновата мощност и слаба от газовия поток и размера на разрядната тръба.

### 5.3. Ротационна и електронна температура на микровълнов плазмен факел

Газовата температура на разряда е от голямо значение при третиране на обекти, чувствителни към нагриване. Малките размери на плазмения факел, вероятността за смущаване на плазмата и прозрачността ѝ за безконтакти термометри прави измерването на газовата температура трудно. В този случай за определяне на плазмените параметри препоръчителен метод е емисионната спектроскопия.

С помощта на емисионната спектроскопия е направена оценка на ротационната температура по ОН линиите и електронната температура [88]. В силно неравновесната микровълнова плазма газовата температура не е равна на ротационната, а е доста по-ниска от нея. Тези две температури обаче имат аналогично поведение и подобни зависимости от разрядните условия. Изучавайки зависимостите на ротационната температура бихме могли да намерим подходящите разрядни условия, осигуряващи достатъчно ниски газови температури за биомедицински приложения.

В плазмен факел при взаимодействие с въздуха се създават възбудени молекули, които излъчват във видимата и UV областта. Най-често в зависимост от състава на плазмата се изследват спектрите на ОН и N<sub>2</sub>. Изследването на спектъра, излъчен от аргонов плазмен факел в областта 306 nm – 308 nm позволява получаването на средна (по дължината на плазмения стълб) ротационна температура  $T_{rot}$  по ОН линиите.

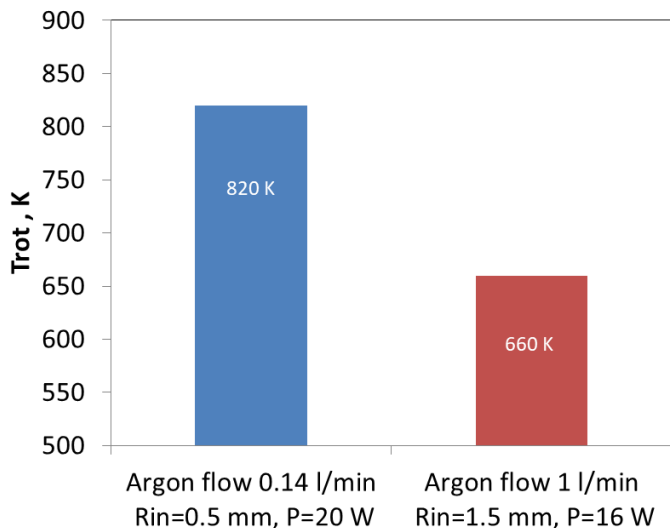
За изследване на зависимостта на ротационната температура от разрядните условия са варирани три параметъра: дебелината на разрядната тръба, газовия поток и вълновата мощност. Използвани са две диелектрични тръби с една и съща диелектрична проникваемост ( $\epsilon_d = 3.8$ ), вътрешен радиус  $R_{in} = 1$  mm и външни радиуси  $R_{out}$  съответно 2 mm и 3.5 mm. Газовият поток се изменя от 0.48 l/min до 3.2 l/min и вълнови мощности в интервала от 14 W до 24 W.

Получените резултати показват три важни зависимости:

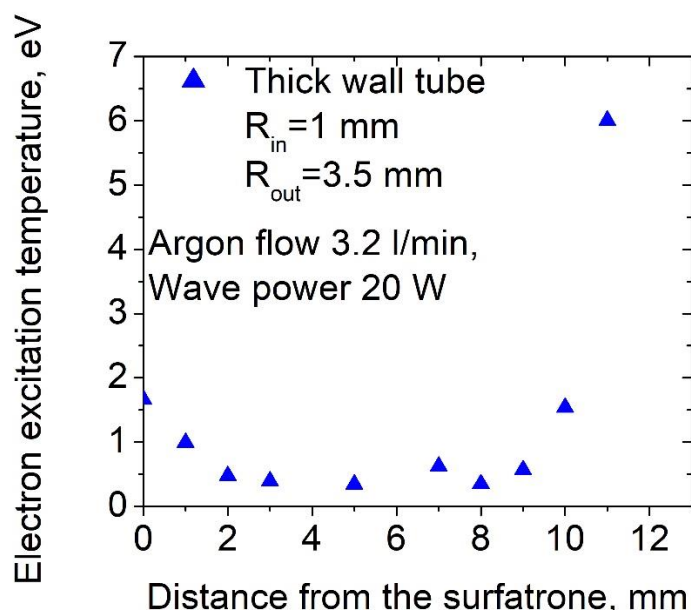
- използването на тънкостенна газоразрядна тръба води до получаване на плазма със значително по-висока ротационна температура в сравнение с дебелостенна кварцова тръба ;
- ротационната температура намалява с увеличаване на потока на аргон ;
- повишаването на вълновата мощност повишава ротационната температура при едни и същи газоразрядни условия – радиус на тръбата и поток на аргон

На фигура 5.15 е показано как едновременно се изменяне на трите параметъра размер на разрядната тръба, газов поток и вложена мощност може да доведе до получаване на плазма с много различна средна ротационна температура. Това изследване показва, че за постигане на ниска газова температура при този вид разряд трябва да бъдат подбрани ниска вълнова мощност, голям газов поток и тръба с дебела стена. Тези параметри обаче не могат да бъдат променяни независимо един от друг, тъй като при много от техните комбинации плазма не може да бъде създадена или е нестабилна.





**Фиг. 5.15** Зависимост на ротационната температура от разрядните условия дебелостенна тръба  $R_{in} = 0.5$  mm,  $R_{out} = 2$  mm и тънкостенна тръба  $R_{in} = 1.5$  mm,  $R_{out} = 2$  mm, грешка 30.



**Фиг. 5.16** Електронна температура при условия: дебелостенна тръба  $R_{in} = 1$  mm,  $R_{out} = 3.5$  mm, поток на аргон 3.2 l/min и вълнова мощност 20W.

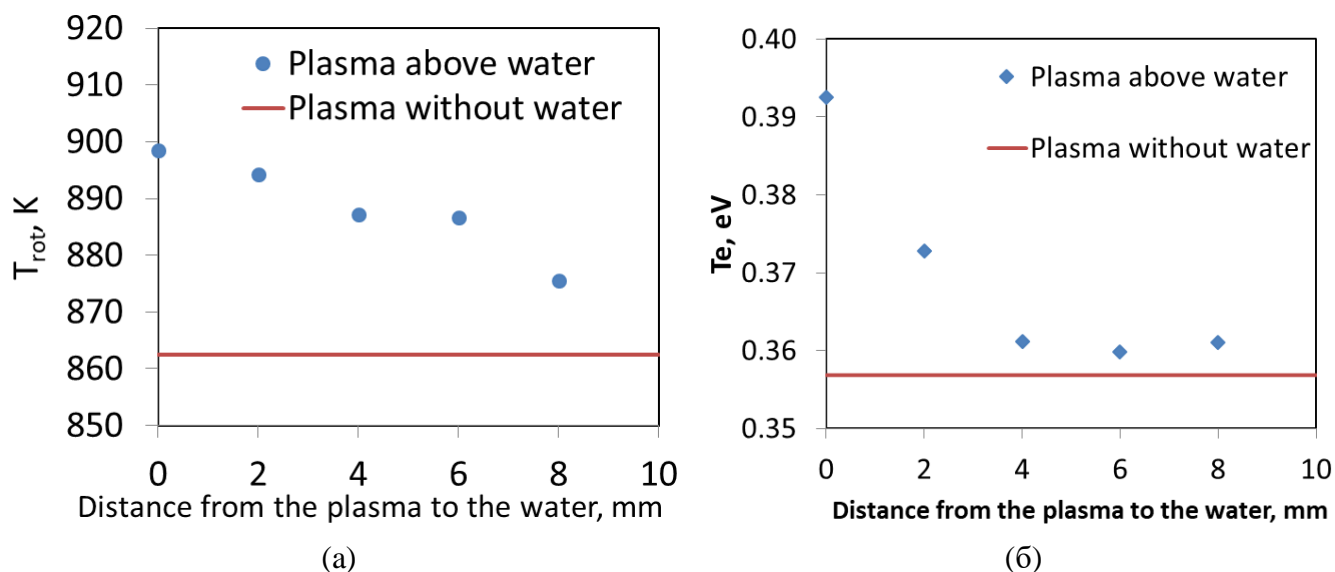
Аксиален профил на електронната температура е представен на фигура 5.16. Измерената стойност е близка до 0.5 eV за по-голямата част от плазмения факел. Както експерименталните резултати, така и самосъгласуваният модел показват повишаване на електронната температура в края на плазмения стълб (виж фиг 4.19 от модела).

Същите плазмени параметри са определени при поставяне на вода под плазмения факел, за да се установи как те се променят при взаимодействието плазма – вода.

Вече видяхме, че при наличие на вода под плазмения факел, плазмата променя своята дължина. Освен геометричните си размери, при взаимодействие с водна повърхност плазмата променя и други свои плазмени параметри като електронна температура  $T_e$  и средната ротационна температура  $T_{rot}$ .

При поставяне на съд с вода на различно разстояние на водната повърхност от края на плазмения факел са измерени електронната температура  $T_e$  и средната ротационна температура  $T_{rot}$

на плазмения стълб на фиксирана позиция 5 mm от сърфатрона. Газоразрядните условия при показания случаи са: вълнова мощност 20 W, поток на аргона 1.4 l/min и разрядна тръба с вътрешен диаметър  $R_{in} = 1$  mm и външен диаметър  $R_{out} = 3.5$  mm. Резултатите за ротационна температура  $T_{rot}$  са показани на фигура 5.18 а, а за електронната температура  $T_e$  на фигура 5.18 б.



**Фиг. 5.18** Плазмен ротационна (а) и електронна (б) температура при разрядни условия: дебелостенна тръба  $R_{in} = 1$  mm,  $R_{out} = 3.5$  mm, поток на аргон 3.2 l/min и вълнова мощност 20 W (грешка 30 K за  $T_{rot}$  и 0.07 eV за  $T_e$ ).

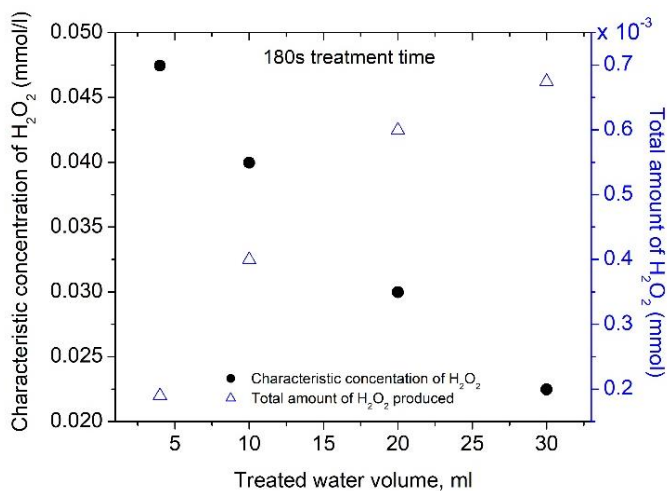
От представените резултати се вижда, че колкото по-близо е водната повърхност до края на плазмения стълб, толкова по-високи са  $T_e$  и  $T_{rot}$ .

#### 5.4 Изменение на характеристиките на водата в резултат на взаимодействието с микровълновия плазмен факел

##### 5.4.1 Определяне на относителна концентрация на водороден пероксид в третирана с плазма вода

Физичните и химичните свойства на водата като проводимост  $\rho_H$ , концентрация на  $H_2O_2$  се променят при третиране с плазма. Това е резултат от взаимодействието на водата с голям брой заредени и възбудени частици от плазмата. Наблюдавано е, че този ефект зависи от времето за третиране, вълновата мощност и обема на третираната течност.

На фигура 5.21 е показана зависимостта на относителната концентрация на  $H_2O_2$  от обема на третираната вода за по-големи обеми. Повърхността на третираната вода е  $23,8$  cm<sup>2</sup> за всички обеми. Тук отново се потвърждава намаляването на относителната концентрацията на образувания водороден пероксид при увеличаване на обема. Общото количество получен  $H_2O_2$  обаче нараства с увеличаване на обема.



**Фиг. 5.21** Концентрация на  $H_2O_2$  при различни обеми на плазмено третираната водата  $H_2O_2$ , вълнова мощност 12 W, време за третиране 180 s, поток на аргона 1.4 l/min и разрядна тръба с  $R_{in} = 1$  mm,  $R_{out} = 3.5$  mm.

### 5.4.3 Приложения на повърхнинновълнова плазма за третиране и почистване на води

Моделната вода представлява симулация на вода с тривиално замърсяване: глюкоза и неорганични соли. Използваната моделна вода има много по-голяма концентрация на замърсители от обичайното замърсяване на отпадни води от промишлеността.

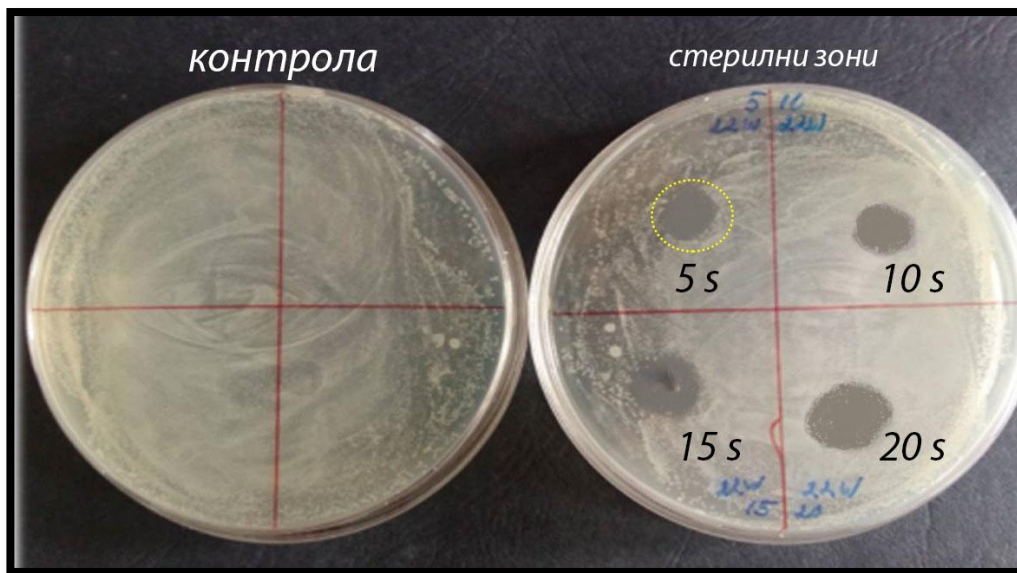
Резултатите от плазменото третиране на моделните води със значително завишена концентрация на типични замърсители при две времена на третиране – 30 s и 60 s. Органичните замърсители (COD) и  $NH_4^+$  йоните се окисляват и намаляват концентрацията си при плазменото третиране – COD с около 20 %, а  $NH_4^+$  със 7–10 %. При това се повишава концентрацията на нитрати. Проводимостта намалява, а рН на замърсените води не се повлиява от плазменото третиране. Тъй като ефектите силно зависят от началната концентрация на замърсителите, тези изследвания трябва да бъдат продължени за изясняване на протичащите процеси и механизмите на разграждане на замърсителите.

### 5.5 Стерилизационния ефект при плазмено третиране

Наличието на микроорганизми в отпадните и питейните води създава рискове и необходимост от тяхната дезинфекция. Традиционните методи за стерилизация на различни обекти се свеждат до третиране с химикали или висока температура. Студената атмосферна плазма предлага алтернативен метод, позволяващ значително по-широка област на приложимост и върху термочувствителни обекти и дори върху живи организми. Заедно с това САП води до ограничаване използването на агресивни химикали и по-чиста околна среда. В проведените експерименти е изследван ефектът на плазмено третиране на микроорганизми в две конфигурации – пряко третиране на монобиофилм от *Pseudomonas sp.* AP-9 върху твърда хранителна среда (агар) с начална микробна плътност  $2 \times 10^7$  cells/ml и пряко третиране на бактериални суспензии от *Pseudomonas sp.* AP-9 и *Brevibacillus laterosporus* BT-271 с плътност  $10^8 \div 10^9$  cells/ml.

#### 5.5.1 Бактерициден ефект на при пряко плазмено третиране на монобиофилм от *Pseudomonas sp.* AP-9

При пряко въздействие на плазма върху микроорганизми *Pseudomonas sp.* AP-9 върху твърда хранителна среда (петри с агар) се наблюдава получаване на зони, в които бактериите са напълно или частично унищожени, в зависимост от разрядните условия. Добре изразени стерилни зони при плазмено третиране с микровълнова мощност 22 W и различна продължителност (5, 10, 15 и 20 s) могат да бъдат наблюдавани на фигура 5.28.

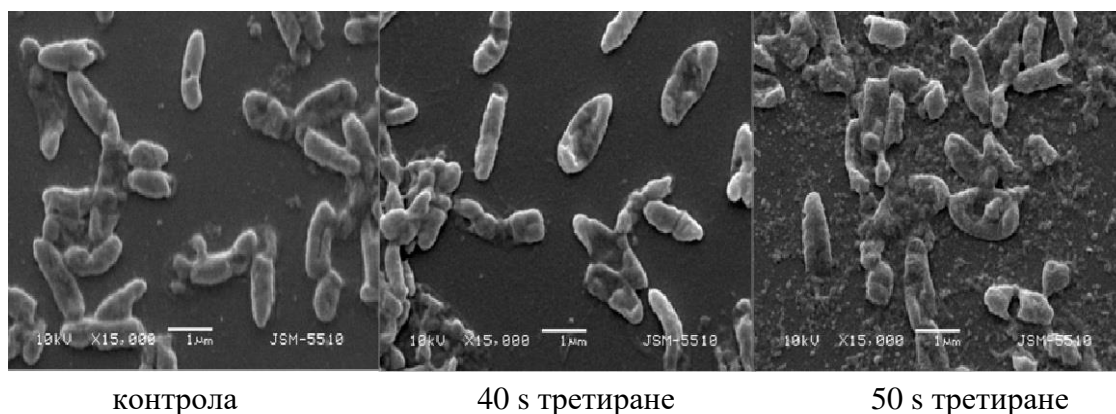


**Фиг. 5.28** Снимка на стерилните зони в монобиофилм на *Pseudomonas sp. AP-9* при мощност 22W и различно време на третиране (ляво) и контрола (дясно)

### 5.5.2 Бактерициден ефект при плазмено третиране на бактериални суспензии от *Pseudomonas sp. AP-9* и *Brevibacillus laterosporus BT-271*

За проследяване ефекта на плазменото третиране на течности, съдържащи Грам положителни или Грам отрицателни бактерии, са третирани суспензии от бактериални култури от *Pseudomonas sp. AP-9* и *Brevibacillus laterosporus BT-271*. Времето за третиране е по-голямо в сравнение със случая в агар, като най-краткото е 10 s, а най-дългото 60 s. Вълновата мощност при третиране на суспензиите е 20 W, потокът на аргона е 1.2 l/min, концентрацията на бактериите е  $1 \cdot 10^8$  клетки на милилитър, третираният обем е 35 ml, а времето на третиране варира от 10 до 60 s.

Установен е силен бактерициден ефект на плазмата, като при *Pseudomonas sp. AP-9* той се проявява дори при много кратко време на третиране, след което увеличаването на времето на третиране не играе съществена роля. Грам положителните микроорганизми са по-устойчиви и концентрацията им намалява по-бавно с времето на третиране. Но и за двата вида микроорганизми бактерицидният ефект е значителен при малка вълнова мощност (20 W) и малко време за третиране (до 1 мин.) с нашия плазмен източник. Това е съществено предимство като се има предвид, че в повечето случаи плазменото третиране с други видове източници има продължителност до няколко часа.



**Фиг. 5.35** Снимки от сканиращ електронен микроскоп на *Pseudomonas sp. AP-9* при различни условия

Третирането с плазма води до значителни промени в повърхността на клетките и до изменения във формата им. След 40 секунди третиране с плазма, голяма част от клетките на *Pseudomonas sp. AP-9* се отличават със силно увредена клетъчна повърхност. При по-дългото време на третиране (50 s третиране) клетките са по-силно деформирани, някои са напълно разрушени и се наблюдава изтичане на клетъчно съдържимо в средата.

## IV. Заключение

В тази работа е направено теоретично и експериментално изследване на плазма създавана и поддържана от повърхнинна вълна. С помощта на самосъгласуван модел са описано вълновите и плазмените характеристики при различни разрядни условия.

Влиянието на честотата на удари електрон–неутрал с предаване на импулс като функция на електронната концентрация е включено в модела като самосъгласувана връзка между кинетичната и електродинамичната му част. Изследването показва че използването на фиксирана честота на ударите води до значителни отклонения във аксиалните профили на всички параметри в сравнение с тези профили, пресмятани с честотата на удари, променяща се по дължината на плазмения стълб.

Разгледан е ефекта на диелектричната проницаемост на заобикалящата плазмата среда. Представените резултати показват, че при наличие на диелектрик вълновата мощност, необходима за поддържане на плазмен стълб с дадена дължина се увеличава с повишаване на диелектричната проницаемост. Полученият плазмен стълб в случая на голяма диелектрична проницаемост на заобикалящата среда има по-голяма плазмена плътност.

Изследван е ефектът на дебелината на диелектричен слой с голяма диелектрична проницаемост. Резултатите показват, че с увеличаване на дебелината на диелектричния слой вълновата мощност, необходима за поддържане на плазмен стълб с дадена дължина се увеличава.

Направено е експериментално изследване на микровълнов плазмен факел в аргон при атмосферно налягане. Една от основните задачи на това изследване беше да се установят режими на работа на устройството, осигуряващи ниска газова температура на микровълновия плазмен факел. Установено е как трите параметъра на газоразрядните условия микровълновата мощност, газовият поток и характеристиките на газоразрядната тръба осигуряват ниската газова температура.

Получените резултати показват три важни зависимости:

- използването на тънкостенна газоразрядна тръба води до получаване на плазма със значително по-висока ротационна температура в сравнение с дебелостенна кварцова тръба;
- ротационната температура намалява с увеличаване на потока на аргон;
- повишаването на вълновата мощност повишава ротационната температура при едни и същи газоразрядни условия – радиус на тръбата и поток на аргон.

Проведеното е изследване на взаимодействието на плазмен факел, създаван от бягаща електромагнитна вълна с честота 2.45 GHz, с течности. Показано е, че при това взаимодействие се променят както плазмените характеристики, така и тези на третираната вода. Направена е оценка на изменението на геометричните размери на плазмения стълб при наличие на вода под него.

Заснемането с високоскоростна камера показва, че при малък газов поток по водната повърхност се плъзгат 3–4 пръстовидни плазмени структури, които се въртят и с просто око се наблюдават като светло петно. При по-голям газов поток, когато плазмата е заобиколена от воден мениск, при наблюдението със скоростна камера се забелязва изменение на формата на плазмения стълб при наличие на вълни по повърхността на водата. При определени газоразрядни условия тези вълни се предават на плазмения стълб и той извършва вълнообразни движения.

Направено е изследване на зависимостта на повлияната от плазмата площ от водната повърхност от разрядните условия. Резултатите показват силна зависимост на размерите на вдлъбнатия мениск на водната повърхност от вложената вълновата мощност и слаба от газовия поток и размера на разрядната тръба.

Получените резултати показват, как плазменото третиране променя химичният и физичният състав на водата. Изследван е ефекта от плазменото третиране върху характеристиките на вода (дестилирана, питейна и различни видове моделни води).

Направена е оценка за изменение на химичните свойства на водата като проводимост рН, концентрация на  $H_2O_2$  и промяна в концентрацията на органични замърсители. Установена е възможност за разграждане на типични битови замърсители в отпадните води при плазменото третиране.

Демонстриран е бактерициден ефект при плазмено третиране на суспензия от Грам положителни и Грам отрицателни микроорганизми. Установен е силен бактерициден ефект на плазмата, като при *Pseudomonas sp.* AP-9 и *Brevibacillus laterosporus* BT- 271 той се проявява дори при много кратко време на третиране и малки вълнови мощности.

### III. Научна дейност на докторанта

#### I. Публикации в реномирани международни списания с импакт-фактор

1. Benova, E., Marinova, P., Atanasova, M., & Petrova, T. (2018). Surface-wave-sustained argon plasma kinetics from intermediate to atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(47) doi:10.1088/1361-6463/aae34d

Impact Factor 2.829

Брой цитирания без самоцитирания: 3

2. Krčma, F., Tsonev, I., Smejkalová, K., Truchlá, D., Kozáková, Z., Zhekova, M., Marinova, P., Bogdanov, T. & Benova, E. (2018). Microwave micro torch generated in argon based mixtures for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(41) doi:10.1088/1361-6463/aad82b

Impact Factor 2.829

Брой цитирания без самоцитирания: 5

3. Marinova, P., Benova, E., Topalova, Y., Todorova, Y., Zhekova, M., Yotinov, Y., Dostal, L., Krcma, F. (2020). Effects of surface-wave-sustained Argon plasma torch interaction with liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, (Submitted)

#### II. Публикации в реномирани международни списания, реферирани в Scopus с SJR

1. Marinova, P., Benova, E., Todorova, Y., Topalova, Y., Yotinov, I., Atanasova, M., & Krcma, F. (2018). Surface-wave-sustained plasma torch for water treatment. *Journal of Physics: Conference Series*, 982(1) doi:10.1088/1742-6596/982/1/012009

SJR Q3

2. Nedyalkova, S., Bozhanova, V., Benova, E., Marinova, P., Tsonev, I., Bogdanov, T. & Koleva, M. (2019). Study on the Effect of Cold Plasma on the Germination and Growth of Durum Wheat Seeds Contaminated with *Fusarium Graminearum*. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 3(4), 623-635. doi: 10.29329/ijiaar.2019.217.8

#### III. Публикации в материали на конференции в пълен текст

1. T. Bogdanov, I. Tsonev, M. Atanasova, **P. Marinova**, Y. Topalova, Y. Todorova, I. Yotinov, E. Benova Surface-wave-sustained plasma source for biomedical applications in *MICROWAVE DISCHARGES: Fundamental and Applications*, edited by Yu. Lebedev; (Yanus-K Moscow, 2018), (10 стр.)

2. E. Benova, **P. Marinova**, T. Bogdanov, I. Tsonev, F. Krčma, Y. Topalova, Y. Todorova, I. Yotinov Interaction of microwave plasma torch sustained by travelling electromagnetic wave with liquids in *MICROWAVE DISCHARGES: Fundamental and Applications*, edited by Yu. Lebedev; (Yanus-K Moscow, 2018), (8 стр.)

3. P. Marinova, M. Atanasova, E. Benova, Heavy particles and rate coefficients in HF and MW discharges in Argon at atmospheric pressure, In: 22nd International Symposium on Plasma Chemistry, 5-11 July 2015, Antwerp, Belgium (4 стр.)

4. P. Marinova, M. Atanasova, E. Benova, Effect of gas discharge conditions on argon surface-wave-sustained plasma torch kinetics, In: XXXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 26th– 31st July 2015, Iasi, Romania (4 стр.)

5. E. Benova, M. Atanasova, P. Marinova Effect of dielectric tube thickness and permittivity on microwave plasma sustained by traveling wave In *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*, ed. A. Gamero, 2015, Cordoba, Spain

6. P. Marinova, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, M. Atanasova, T. Bogdanov, I. Yotinov, F. Krcma, Surface-Wave-Sustained Plasma Torch For Water Treatment, In: Book of Contributed Papers, 21st Symposium on Application of Plasma Processes (SAPP XXI), 13 – 18 January 2017, Štrbské Pleso, Slovakia (6 стр.)

#### IV. Участия в научни национални и международни семинари и конференции:

1. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Atmospheric Surface-Wave-Sustained Argon Plasma Kinetics*, International Conference “The Physics of Low Temperature Plasma”, 20 – 23 May 2014, Kazan, Russia – **постер**
2. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Atmospheric surface-wave-sustained argon plasma kinetics*, 6<sup>th</sup> International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 90 June – 6 July 2014, Kiten, Bulgaira – **устен доклад**
3. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Effect of Gas Discharge Conditions on Argon Surface-Wave-Sustained Plasma Torch*, International FOR1123-Workshop "Young Professionals in Microplasma Research", 24 – 26 November 2014, Bochum, Germany – **устен доклад**
4. Summer Training Course 2015, Prague, Czech Republic – *Effect of the Resonant Magnetic Perturbation on the Plasma Parameters in Divertor Region of the COMPASS Tokamak*
5. FuseNet PhD Event 2015, Prague, Czech Republic – *Effect of the Resonant Magnetic Perturbation on the Plasma Parameters in Divertor Region of the COMPASS Tokamak*
6. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Heavy particles and rate coefficients in HF and MW discharges in Argon at atmospheric pressure* – 22<sup>nd</sup> International Symposium on Plasma Chemistry, 5 – 11 July 2015, Antwerp, Belgium – **постер и публикация в пълен текст**
7. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Effect of gas discharge conditions on argon surface-wave-sustained plasma torch kinetics* – XXXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 26 – 31 July 2015, Iasi, Romania – **постер**
8. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Reaction kinetics, heavy particles and rate coefficients in HF and MW discharges in argon at atmospheric pressure* – 19<sup>th</sup> International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, 21 – 25 September 2015 г., Sozopol, Bulgaria – **устен доклад**
9. **P. Marinova**, M. Atanasova, E. Benova, *Theoretical Investigation of Argon Surface-Wave-Sustained Plasma Torch at Atmospheric Pressure* – 14th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia, 27 – 30 септември 2015 г., в Хамамацу, Япония – **постер и устен доклад**
10. 13<sup>th</sup> International Summer Training Course (SUMTRAIC) on Experimental Plasma Physics, 22 August – 5 September 2015, Prague, Czech Republic, *Effect of the Resonant Magnetic Perturbation on the Plasma Parameters in Divertor Region of the COMPASS Tokamak*
11. *Effect of the Resonant Magnetic Perturbation on the Plasma Parameters in Divertor Region of the COMPASS Tokamak*, FuseNet PhD Event 2015, 14–18 November 2015, Prague, Czech Republic – **постер**
12. **P. Marinova**, M. Pencheva, M. Zhekova, E. Benova, *Theoretical and Experimental Investigation of Various Configurations of Surface-Wave-Sustained Plasma in Contact With Liquids*, The International Conference on Electrical Discharges with Liquids, 14 – 16 March 2016 г., Kocaeli, Turkey – **постер**
13. **P. Marinova**, M. Zhekova, M. Atanasova, E. Benova, Frantisek Krcma, Lukas Dostal, *Experimental Investigation of Surface-Wave-Sustained Plasma With Liquids*, 7<sup>th</sup> International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 26 June – 2 July 2016, Китен, България – **постер**
14. E. Benova, Y. Topalova, **P. Marinova**, Y. Todorova, M. Atanasova, Todor Bogdanov, Ivaylo Yotinov, Frantisek Krcma, Lukas Dostal, *Surface-Wave-Sustained Plasma Torch for Biomedical Applications*, 7<sup>th</sup> International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 26 June – 2 July 2016, Kiten, Bulgaira – **поканен доклад**
15. **P. Marinova**, M. Pencheva, E. Benova, *Surface-Wave-Sustained Plasma Torch*, 3rd Training School: Advanced Diagnostics of Discharges with Liquids and Plasma Treated Liquid Phase in frame of COST TD1208: Electrical discharges with liquids for future applications, 24 - 28 September 2016, Zemun-Belgrade, Serbia - **устен доклад**
16. **P. Marinova**, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, M. Atanasova, T. Bogdanov, I. Yotinov, F. Krcma, *Surface-Wave-Sustained Plasma Torch For Water Treatment*, 21st Symposium on Application of Plasma Processes (SAPP XXI), Štrbské Pleso, Slovakia 13 – 18 January 2017 – **устен доклад**
17. **P. Marinova**, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, M. Atanasova, I. Yotinov, F. Krcma, *Surface-wave-sustained plasma torch for biomedical applications*, International Conference on Plasmas with Liquids (ICPL 2017) final meeting of the COST Action TD1208, Prague, Czech Republic, 5 - 9 March 2017 - **постер**
18. **P. Marinova**, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, M. Zhekova, Ivaylo Yotinov, F. Krcma, *Cold Argon Plasma Torch For Water Treatment*, International Conference “The Physics of Low Temperature Plasma” (PLTP-2017), Kazan, Russian Federation, 5 – 9 June, 2017 – **постер**

19. **P. Marinova**, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, M. Zhekova, I. Yotinov, F. Krcma, *Theoretical and experimental investigation of atmospheric pressure microwave discharge in contact with liquid* – 20<sup>th</sup> International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, September 2017 г., Sozopol, Bulgaria – **устен доклад**

20. P. Marinova, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, I. Yotinov, T. Vatchev, L. Nacheva, S. Milusheva, N. Dimitrova, *Surface-wave-sustained plasma torch for biological systems treatment*, 8th International Workshop & Summer School on Plasma Physics, July 2018, Kiten, Bulgaria – **устен доклад**

21. **P. Marinova**, E. Benova, Y. Topalova, Y. Todorova, I. Yotinov, Tz. Vatchev, L. Nacheva, S. Milusheva, N. Dimitrova, *Microwave Argon Plasma For Biological Systems Treatment* – 21<sup>st</sup> International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, 23 – 29 September 2019 г., Sozopol, Bulgaria – **постер**

#### **V. Посещения в други научни центрове и университети:**

1. Student visit in the frame of COST Action TD1208 Electrical Discharges with Liquids for Future Applications at Brno University of Technology, Brno, Czech Republic – 28.3.2016 – 30.4.2016, тема: *Experimental investigation of surface-wave-sustained plasma with liquids*

2. Student visit in the frame of COST Action TD1208 Electrical Discharges with Liquids for Future Applications at Brno University of Technology, Brno, Czech Republic – 25 February – 4 March 2017, тема: Surface-wave-sustained plasma torch in contact with liquids

#### **VI. Забелязан цитат на статия:**

Krčma, F., Tsonev, I., Smejkalová, K., Truchlá, D., Kozáková, Z., Zhekova, M., Marinova, P., Bogdanov, T. & Benova, E. (2018). Microwave micro torch generated in argon based mixtures for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(41) doi:10.1088/1361-6463/aad82b

- Akishev, Y., Machala, Z., & Koval, N. (2019). Special issue on recent developments in plasma sources and new plasma regimes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(13) doi:10.1088/1361-6463/ab0004
- Chen, C. -, Li, S. -, Wu, Y., & Zhang, J. (2019). Investigation of role of the discharge tube in pulse modulated surface-wave argon plasma column at atmospheric pressure by optical emission spectroscopy. *Physics of Plasmas*, 26(5) doi:10.1063/1.5093670
- Kutasi, K., Popović, D., Krstulović, N., & Milošević, S. (2019). Tuning the composition of plasma-activated water by a surface-wave microwave discharge and a kHz plasma jet. *Plasma Sources Science and Technology*, 28(9) doi:10.1088/1361-6595/ab3c2f
- Liang, J., Zhou, X., Zhao, Z., Wang, W., Yang, D., & Yuan, H. (2019). Reactive oxygen and nitrogen species in ar + N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> atmospheric-pressure nanosecond pulsed plasmas in contact with liquid. *Physics of Plasmas*, 26(2) doi:10.1063/1.5063707
- Saifutdinov, A. I., Kustova, E. V., Karpenko, A. G., & Lashkov, V. A. (2019). Dynamics of focused pulsed microwave discharge in air. *Plasma Physics Reports*, 45(6), 602-609. doi:10.1134/S1063780X19050106

Benova, E., Marinova, P., Atanasova, M., & Petrova, T. (2018). Surface-wave-sustained argon plasma kinetics from intermediate to atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(47) doi:10.1088/1361-6463/aae34d

- Chen, C. -, Li, S. -, Wu, Y., & Zhang, J. (2019). Investigation of role of the discharge tube in pulse modulated surface-wave argon plasma column at atmospheric pressure by optical emission spectroscopy. *Physics of Plasmas*, 26(5) doi:10.1063/1.5093670
- Durocher-Jean, A., Delnour, N., & Stafford, L. (2019). Influence of N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub> admixtures on the electron power balance and neutral gas heating in microwave ar plasmas at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(47) doi:10.1088/1361-6463/ab373a
- Popov, N., Babaeva, N., & Naidis, G. (2019). Recent advances in the chemical kinetics of non-equilibrium plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(16) doi:10.1088/1361-6463/aaff46



## IV. Литература

1. Trivelpiece, Alvin W. Slow wave propagation in plasma waveguides. Dissertation (Ph.D.), (1958)
2. D. T. Tuma, *A quiet uniform microwave gas discharge for lasers*, Rev. Sci. Instrum. **41** (1970) 1519–1520
3. M. Moisan, C. Beaudry, and P. Leprince, *A new HF device for the production of long plasma columns at a high electron density*, Phys. Lett. **50A** (1974) 125–126
4. M. Moisan and Z. Zakrzewski, *Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves*, J. Phys. D: Appl. Phys. **24** (1991) 1025–1048
5. Z. Zakrzewski and M. Moisan, *Plasma sources using long linear microwave field applicators: main futures, classifications and modelling*, Plasma Sources Sci. Technol. **4** (1995) 379–397
6. David B. Graves, “*Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review*”, Phys. Plasmas **21**, 080901, 2014.
7. Deng X T, Shi J and Kong M G 2006 Physical mechanisms of inactivation of Bacillus subtilis spores using cold atmospheric plasmas IEEE Trans. Plasma Sci. **34** 1310–6
8. Lee H W, Kim G J, Kim J M, Park J K, Lee J K and Kim G C 2009 Tooth bleaching with nonthermal atmospheric pressure plasma J. Endod. **35** 587–91
9. Rampling A, Wiseman S, Davis L, Hyett A P, Walbridge A N, Payne G C and Cornaby A J 2001 Evidence that hospital hygiene is important in the control of methicillin-resistant Staphylococcus aureus. J. Hosp. Infect. **49** 109–16
10. Laroussi et al., 2006
11. Weltmann et al 2009, Bekeschus et al 2016
12. Zdenka Persin, Miran Mozetic, Alenka Vesel, Tina Maver, Uros Maver and Karin Stana Kleinschek (2013). Plasma Induced Hydrophilic Cellulose Wound Dressing, Cellulose - Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications, Dr. Theo G.M. Van De Ven (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/55867.
13. Fridman G, Friedman G, Gutsol A, Shekhter A B, Vasilets V N and Fridman A 2008 Applied plasma medicine Plasma Process. Polym. **5** 503–33
14. Laroussi M and Leipold F 2004 Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure *Int. J. Mass Spectrom.* **233** 81–6
15. Laroussi M 2002 Non-thermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: review, analysis and prospects IEEE Trans. Plasma Sci. **30** 1409–15
16. G. Fridman et. al. “*Bio-Medical Applications of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma*” in “Proc. 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, San Francisco, California, 5-8 June, 2006”, AIAA -2902, 2006.
17. Y. J. Hong, et. al. “*Non-thermal atmospheric pressure plasma sources for biomedical applications*”, Plasma Phys. Control. Fusion **47** (12B): S38, 2005.
18. G. Y. Park et. al. “*Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications, INVITED REVIEW*”, Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 043001, 2012.
19. Wang, D.; Namihira, T.; Akiyama, H. (2010). Pulsed discharge plasma for pollution control, Air Pollution, Vanda Villanyi (Ed.), ISBN: 978-953-307-143-5, InTech
20. L.F. Spencer, A.D. Gallimore, Efficiency of CO<sub>2</sub> dissociation in a radio-frequency discharge, Plasma Chem. Plasma Process., **31** (2011), pp. 79–89
21. M. Tsuji, T. Tanoue, K. Nakano, Y. Nishimura, Decomposition of CO<sub>2</sub> into CO and O in a microwave-excited discharge flow of CO<sub>2</sub>/He or CO<sub>2</sub>/Ar mixtures, Chem. Lett., **1** (2001), pp. 22–23 November
22. R. Aerts, Experimental and Computational Study of Dielectric Barrier Discharges for Environmental Applications, University of Antwerp, Belgium (2014),
23. S. Paulussen, B. Verheyde, X. Tu, C. De Bie, T. Martens, D. Petrovic, A. Bogaerts, B. Sels, Conversion of carbon dioxide to value-added chemicals in atmospheric pressure dielectric barrier discharges, Plasma Sources Sci. Technol., **19** (2010), p. 034015
24. Lukes et al., Plasma Sources Sci. Technol. **17** (2008) 024012
25. Graves D B 2012 J. Phys. D: Appl. Phys. **45** 263001
26. *Seri Paolo, Department of Industrial Engineering, Alma Mater Studiorum Universita di Bologna, Bologna, Italy*

27. Shu and Chang, 2005, Shu H.Y., Chang M.C. Pre-ozonation coupled with UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process for the decolorization and mineralization of cotton dyeing effluent and synthesized C.I. Direct Black 22 wastewater J Hazard Mater, 121 (2005), pp. 127-133
28. Abdelmalek et al., 2004 Abdelmalek F., Guarbi S., Benstaali B., Addou A., Brisset J.L. Plasma chemical degradation of azo dyes by humid air plasma: yellow supranol 4 GL, scarlet red nylosan F3 GL and industrial waste
29. Mirosław Dors, *Applications of electrical discharges with liquids*, COST action TD1208 Electrical discharges with liquids for future applications, meeting in Bratislava, 19-27 oct. 2013
30. M Černák et al 2011 Plasma Phys. Control. Fusion 53 124031
31. Li et al. Appl. Phys. Rev. 4, 021306 (2017)
32. Bundaleska, N., Henriques, J., Abrashev, M. et al. Large-scale synthesis of free-standing N-doped graphene using microwave plasma. Sci Rep 8, 12595 (2018) doi:10.1038/s41598-018-30870-3
33. J. Y. Tong et al. “Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andrographis paniculata*”, Plasma Sci. Technol. 16, 260, 2014.
34. M.Dhayal et al. “Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium L. seed surface modification*”, Vacuum 80, 499, 2006.
35. L. Li et al. “Effects of cold plasma on seed germination and seedling growth of soybean”, Sci. Rep. 4, 5859, 2014.
36. B. Šerá et al. “Germination of *Chenopodium Album* in response to microwave plasma treatment”, Plasma Sci. Technol. 10, 506, 2008.
37. H. H. Chen et al. “Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice”, Food Chem. 135, 74, 2012.
38. B. Šerá et al. “Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth”, IEEE T. Plasma Sci. 38, 2963, 2010.
39. M. Henselová et al. “Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma”, Biologia 67, 490, 2012.
40. Z. W. Zhou et al. “Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds”, Agri. Sci. 2, 23, 2011.
41. J. F. Jiang et al. “Effect of seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (bacterial wilt)”, Plos One 9, 1, 2014.
42. Li Ling et al. “Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress”, Sci. Rep., 5, 13033, 2015.
43. Stryczewska, H. D., Ebihara, K., Takayama, M., Gyoutoku, Y. and Tachibana, M. (2005), Non-Thermal Plasma-Based Technology for Soil Treatment. Plasma Processes Polym., 2: 238–245. doi:10.1002/ppap.200400061
44. Shen, J. et al. Bactericidal Effects against *S. aureus* and Physicochemical Properties of Plasma Activated Water stored at different temperatures. Sci. Rep. 6, 28505; doi: 10.1038/srep28505 (2016).
45. Sivachandiranab, A. Khacef, Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment, DOI: 10.1039/c6ra24762h L.
46. Z. Zakrzewski, M. Moisan, V. M. M. Glaude, C. Beaudry, and P. Leprince, *Attenuation of a surface wave in an unmagnetized RF plasma column*, Plasma Phys. 19 (1977) 77–83
47. V. M. M. Glaude, M. Moisan, R. Pantel, P. Leprince, and J. Marec, *Axial electron density and wave power distributions along a plasma column sustained by the propagation of a surface microwave*, J. Appl. Phys. 51 (1980) 5693–5698
48. C. M. Ferreira, *Theory of plasma column sustained by surface wave*, J. Phys. D: Appl. Phys. 14 (1981) 1811–1830
49. C. M. Ferreira, *Modelling of low-pressure plasma column sustained by a surface wave*, J. Phys. D: Appl. Phys. 16 (1983) 1673–1685
50. Z. Zakrzewski, *Conditions of existence and axial structure of long microwave discharges sustained by travelling waves*, J. Phys. D: Appl. Phys. 16 (1983) 171–180
51. E. Mateev, I. Zhelyazkov, and V. Atanassov, *Propagation of a large-amplitude surface wave in a plasma column sustained by the wave*, J. Appl. Phys. 54 (1983) 3049–3092

52. C. M. Ferreira and J. Loureiro, *Characteristics of high-frequency and direct-current argon discharges at low pressures: a comparative analysis*, J. Phys. D: Appl. Phys. **17** (1984) 1175–1188
53. I. Zhelyazkov, E. Benova, and V. Atanassov, *Axial structure of a plasma column produced by a large amplitude electromagnetic surface wave*, J. Appl. Phys. **59** (1986) 1466–1472
54. C. M. Ferreira, *Plasmas sustained by surface waves at radio and microwave frequencies: Basic properties and modeling*, in *Radiative Processes in Discharge Plasmas*, edited by J. M. Proud and L. H. Luessen (Plenum, New York, 1986), pp. 431–466
55. C. Boisse-Laporte, A. Granier, E. Dervisevic, P. Leprince, and J. Marec, *Microwave discharges produced by surface waves in argon gas*, J. Phys. D: Appl. Phys. **20** (1987) 197–209
56. C. M. Ferreira and M. Moisan, *The similarity laws for the maintenance field and the absorbed power per electron in low-pressure surface wave produced plasmas and their extension to HF plasmas in general*, Phys. Scripta **38** (1988) 382–399
57. I. Zhelyazkov and E. Benova, *Modeling of a plasma column produced and sustained by a traveling electromagnetic surface wave*, J. Appl. Phys. **66** 1641–1650 (1989)
58. C. M. Ferreira, *A basic self-contained model of a plasma column sustained by a weakly damped surface wave*, J. Phys. D: Appl. Phys. **22** (1989) 705–708
59. C. M. Ferreira, *Theory of high-frequency discharges*, in *Nonequilibrium Processes in Partially Ionized Gases*, edited by M. Capitelly and J. N. Bardsley (Plenum, New York, 1990), pp. 187–212
60. E. Benova and I. Zhelyazkov, *Theoretical study of the influence of a metal enclosure on the parameters of a plasma column sustained by a travelling electromagnetic surface wave*, Phys. Scripta **43** (1991) 68–73
61. U. Kortshagen, H. Schlüter, and A. Shivarova, *Determination of the electron energy distribution function in surface wave produced plasmas: I. Modelling*, J. Phys. D: Appl. Phys. **24** (1991) 1571–1584
62. A. B. Sá, C. M. Ferreira, S. Pasquiers, C. Boisse-Laporte, P. Leprince, and J. Marec, *Self-consistent modeling of surface wave produced discharges at low pressures*, J. Appl. Phys. **70** (1991) 4147–4157
63. Z. Zakrzewski, M. Moisan, J. Margot, and G. Sauvé, *Spatial distributions of electron density and electric field in discharges sustained within microwave circuits*, Plasma Sources Sci. Technol. **1** (1992) 28–35
64. Y. M. Aliev, K. M. Ivanova, M. Moisan, and A. P. Shivarova, *Analytical expressions for the axial structure of a surface wave sustained plasma under various regimes of charged particles loss*, Plasma Sources Sci. Technol. **2** (1993) 145–152
65. C. M. Ferreira, *Kinetic modeling of microwave discharges*, in *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*, edited by C. M. Ferreira and M. Moisan (Plenum, New York, 1993), pp. 313–337
66. I. Zhelyazkov and V. Atanassov, *Axial structure of low-pressure high-frequency discharges sustained by travelling electromagnetic surface waves*, Phys. Rep. **255** (1995) 79–210
67. X. L. Zhang, F. M. Dias, C. M. Ferreira, *A self-contained modelling and experimental study of surface wave produced argon discharges in a coaxial setup with a central metallic cylinder: I. Modelling*, Plasma Sources Sci. Technol. **6** (1997) 29–38
68. V. Georgieva, A. Berthelot, T. Silva, St. Kolev, W. Graef, N. Britun, G. Chen, J. van der Mullen, T. Godfroid, D. Mihailova, J. van Dijk, R. Snyders, A. Bogaerts, and M.-P. Delplancke-Ogletree, *Understanding microwave surface-wave sustained plasmas at intermediate pressure by 2D modeling and experiments*, 2017
69. E. Benova, M. Atanasova, T. Bogdanov, P. Marinova, F. Krcma, V. Mazankova, *Microwave plasma torch at water surface*, Plasma medicine, 2016, DOI:10.1615/PlasmaMed.2016015862
70. E. Carbone, *Laser diagnostics and modelling of microwave plasmas*, PhD thesis, 2013
71. Jimenez-Diaz, M., Carbone, E. A. D., Van Dijk, J., & Van Der Mullen, J. J. A. M. (2012). A two-dimensional plasmo multiphysics model for the plasma-electromagnetic interaction in surface wave discharges: The surfatron source. Journal of Physics D: Applied Physics, 45(33) doi:10.1088/0022-3727/45/33/335204
72. Petrova Ts., Benova E., Petrov G. and Zhelyazkov I. Phys. Rev. E, 1999, 60, 875.
73. M. Ferreira and J. Loureiro, J. Phys. D: Appl. Phys **16**, 2471 (1983).

- 74.** Manuel Jimenez Diaz Modelling of Microwave Induced Plasmas: The interplay between electromagnetism, plasmachemistry and transport, PhD thesis, 2011
- 75.** M. Atanasova, Modelling of atmospheric pressure argon plasmas: Application to capacitive RF and surface microwave discharges, PhD thesis, 2013
- 76.** M Pencheva, E Benova and I Zhelyazkov, *Surface wave propagation characteristics in atmospheric pressure plasma column*, *Journal of Physics: Conference Series* 63 (2007) 012023
- 77.** Petrova Ts., Benova E., Petrov G. and Zhelyazkov I. *Phys. Rev. E*, 1999, 60, 875.
- 78.** García M.C., Rodero A., Sola A., Gomero A. *Spectrochim. Acta B*, 2000, 55, 1733
- 79.** Margot J. and Moisan M. *J. Plasma Phys.*, 1993, 49, 357.
- 80.** R. Winkler, M. Capitelli, M. Dilonardo, C. Gorse, and J. Wilhelm, *Electron kinetics of weakly ionized collision-dominated RF plasma in CO*, *Plasma Chem. Plasma Process.* **6** (1986) 437–456
- 81.** E. Benova, Self-consistent modelling of surface-wave-sustained discharges from low to atmospheric pressures in *MICROWAVE DISCHARGES: Fundamental and Applications*, edited by Yu. A. Lebedev, Yanus-K, Moscow 2006, pp. 9-18
- 82.** Moisan M, Beaudry C and Leprince P 1974 *Phys. Lett.* 50 125
- 83.** Moisan M, Zakrzewski Z and Pantel R 1979 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 12 219
- 84.** Moisan M and Nowakowska H 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* 27 073001
- 85.** Bruggeman P, Schram D C, Kong M G and Leys C 2009 Is the rotational temperature of OH(A-X) for discharges in and in contact with liquids a good diagnostic for determining the gas temperature? *Plasma Proc. Polym.* 6 751
- 86.** Kramida A, Ralchenko Yu, Reader J and NIST ASD Team 2018 NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.3), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd>[2018, March 31]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- 87.** Krčma, F, Tsonev, I, Smejkalová, K, Truchlá, D, Kozáková, Z, Zhekova, M, Marinova, P, Bogdanov, T and Benova, E 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 414001
- 88.** Bruggeman P et al 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* 18 025017
- 89.** Berndt J., Makasheva K., Schlüter H., and Shivarova A., 2002 *Journal of Applied Physics* 92, 6461; doi: 10.1063/1.1519339
- 90.** Koleva I., Shivarova A., Makasheva K., and Schlüter H., 2005 *Journal of Applied Physics* 97, 043302; doi: 10.1063/1.1841467
- 91.** Makasheva, K., & Shivarova, A. (2002). Plasma parameters of diffusion-controlled microwave discharges in surface-wave fields. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30(1 III), 384-390. doi:10.1109/TPS.2002.1003885
- 92.** Makasheva, K., Marinov, K., Shivarova, A., Stoev, L., & Tarnev, K. (2004). Travelling-wave-sustained discharges. *Vacuum*, 76(2-3), 369-376. doi:10.1016/j.vacuum.2004.07.054