



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ"
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

ДИМИТЪР ЙОРДАНОВ ЙОРДАНОВ

МАТРИЧЕН ИЗТОЧНИК
НА ОТРИЦАТЕЛНИ ВОДОРОДНИ ЙОНИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на
образователната и научна степен "доктор"

Професионално направление:

4.1. Физически науки (Физика на плазмата и газовия разряд)

Научен ръководител
проф. дфн Антония Шиварова
Научен консултант
доц. д-р Стилиян Лишев

София, 2016

Дисертационният труд е обсъден и одобрен за защита от Катедрения съвет на катедра "Радиофизика и електроника" на Физическия факултет на СУ "Климент Охридски", състоял се на 13.12.2016 г.

Дисертационния труд съдържа 158 страници, 102 фигури и 3 таблици. Цитирани са 148 литературни източника.

Докторантурата е редовна към катедра "Радиофизика и електроника" на Физическия факултет на СУ "Св. Климент Охридски".

Изследванията по дисертацията са проведени в Лабораторията по Физика на плазмата и газовия разряд към Физическия факултет на СУ "Климент Охридски".

Защитата на дисертационната работа ще се състои на от часа в зала А415 на Физическия факултет, СУ "Климент Охридски", София, бул. Джеймс Баучър №5. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физически факултет на СУ "Св. Климент Охридски", София, бул. Джеймс Баучър №5, сграда А и на сайта на Физическия факултет

Актуалност на темата

Източниците на снопове от заредени частици са в основата на редица приложения във физичната електроника и физиката на плазмата и газовите разряди. Рентгеновите тръби, електронните микроскопи, фотоумножителите и СВЧ приборите, както и вакуумните технологии са примери за приложение на електронни снопове. Примери за приложение на йонни снопове са мас-спектроскопията, йонната имплантация, вторичната йонно-йонна спектроскопия, плазмените реактивни двигатели. Плазмените източници в ускорителите на заредени частици и в системите за допълнително нагряване на термоядрена плазма чрез снопове от високоенергетични неутрални частици и плазмените източници за микро- и нано-технологиите са също източници на йонни снопове.

Докато електронните пушки са обикновено източниците на електронни снопове, то йонните снопове се извличат от газоразрядна плазма. Използваните разряди са както постоянно-токови разряди, така и високочестотни и микровълнови разряди при ниско налягане. Сред източниците на йонни снопове съществено място заемат източниците на водородни йони, с техните приложения на първо място в ускорителите на заредени частици и в системите за допълнително нагряване на термоядрена плазма.

Извличането на йонните снопове е чрез извличащи устройства, представляващи многоелектродни системи, на които се подава висок – по големина – потенциал. Докато с подаването на висок отрицателен потенциал на извличащата система при източниците на положителни йони се извличат само йони, то при източниците на отрицателни йони с подаването на висок положителен потенциал от разряда се извличат не само йони, но и електрони, чийто ток трябва да се отдели. Друг основен проблем при източниците на отрицателни йони е тяхното създаване, понеже концентрацията им е само част – и то по-малката – от общия отрицателен заряд в разряда. Два са основните начини за създаване на отрицателните йони H^- – в обема на плазмата (в резултат на двустъпалната реакция на дисоциативно прилепване на електрон към вибрационно възбудена молекула) и повърхнинно създаване (на стени на разряда, чрез прилепване на електрони към водородни атоми H или атомни водородни йони H^+).

С оглед на ефективността на конверсията на H и H^+ в H^- при повърхнинното създаване на йоните е необходимо материалът на стените да е с ниска отделителна работа. Това налага внасяне на цезий в разряда. Въпреки високите стойности на

извличаните токове от повърхнинно създадени отрицателни йони, замърсяването с цезий е основен недостатък.

Използването на обемното създаване на йоните в източниците на отрицателни водородни йони е с предимства, но е необходимо да се намери начин за повишаване на ефективността му. Наложилит се – още от 80-те години на миналия век – тандемен плазмен източник е еднокамерен източник с пространствено разделени области – посредством магнитен филтър – с високо- и ниско-енергетични електрони. Има се предвид създаване на условия за стимулиране на обемното им създаване. Идеята е първоначално въведена в постоянно-токовите източници – при които поведението на разряда е локално – и е пренесена в разработваните напоследък ВЧ двукамерни източници. Но локализирано внасяне на ВЧ мощност и двукамерната конструкция на източника води до силна нелокалност в поведението на разряда и незадоволителни стойности на извлечените токове от отрицателни йони.

Съществена роля на потоците и, следователно, на условията на нелокалност са основни характеристики на ВЧ разрядите при ниско налягане. Това води до формулиране на нова концепция за конструкция на ВЧ източник на отрицателни водородни йони, която се основава на нелокалността в поведението на разряда – концепция за матричен източник, представляващ матрица от индуктивни разряди с малък радиус, обща планарна намотка и единична екстрахираща апертура при всеки разряд [1]. Малкият (2-3 cm) радиус на разряда е в основата на концепцията, тъй като осигурява висока концентрация на отрицателните йони в областта с висок потенциал на постоянното електрично поле в разряда. Няма пространствено разделяне на разряда на две области, а натрупването на йони в тази област е чрез потока им в постоянното електрично поле, което е силно поради малкият радиус на разряда [2-4]. Изборът за плоска намотка на индуктивния разряд осигурява конструктивна възможност за комплектуване на разрядите в матрица. Но това поставя основни въпроси във връзка с извличането на йоните, тъй като поведението на йоните в разряда се контролира от постоянното електрично поле в него, а максимумът на потенциалът на полето в индуктивните разряди с плоска намотка е в близост до намотката, т.е. далече от областта на екстракция.

Цел и задачи на дисертацията

Изследвания с оглед на извличането на обемно-създавани отрицателни водородни йони от единичен елемент на матричен плазмен източник е крайната цел в

работата по настоящата дисертация. Освен експерименти – измервания на извлечените токове от отрицателни йони и електрони – това включва и определяне на фактори, влияещи на извличането на йоните, както и изграждане на концепция за тяхното извличане. Последното означава намиране на начин за формиране на висока концентрация на отрицателните йони в близост до областта на екстракцията им, т.е. в близост до извличащото устройство.

Конкретните формулировка на задачите по дисертацията, е както следва:

1. Диагностика на плазмата в първата камера на двукамерен плазмен източник, основаващ се на индуктивен разряд с плоска намотка.
2. Диагностика на плазмата на единичен елемент на матричен източник.
3. Влияние на Ленгмюрова сонда върху структурата на индуктивен разряд с плоска намотка.
4. Извличане на отрицателни водородни йони от единичен елемент на матричен източник (тест на факторите, влияещи на извличането на йоните, формулиране и мотивировка на концепция за тяхното извличане и експерименти по извличането им).

Съдържание на дисертацията

Дисертацията се състои от увод и пет глави.

Глава 1 е литературен обзор на въпроси, свързани с изследванията в дисертацията. Глави от 2 до 5 представляват изследванията по всяка една от задачите в дисертацията. В заключение са обобщени основните резултати и научни приноси на съдържащите се в дисертационния труд изследвания.

Кратко изложение на дисертацията

Глава 2 представя **експериментални резултати [A1]** от сондова диагностика, диагностика по метода на лазерното фотоотделяне в комбинация със сонда и диагностика по метода на оптичната емисионна спектроскопия с фазово разделяне. **Измерванията са в първата камера на двукамерен плазмен източник (Фиг. 1), основаващ се на индуктивен разряд с плоска намотка.**

По отношение на индуктивния разряд с плоска намотка се цели:

(а) идентифициране на модовете на разряда – капацитивен и индуктивен; с оглед на това внесена – за поддържане на разряда – ВЧ мощност е изменяна в сравнително

широк диапазон ((50 - 400) W), което осигурява поддържане на двата режима на работа (Е- и Н-мод) на индуктивен разряд с плоска намотка,

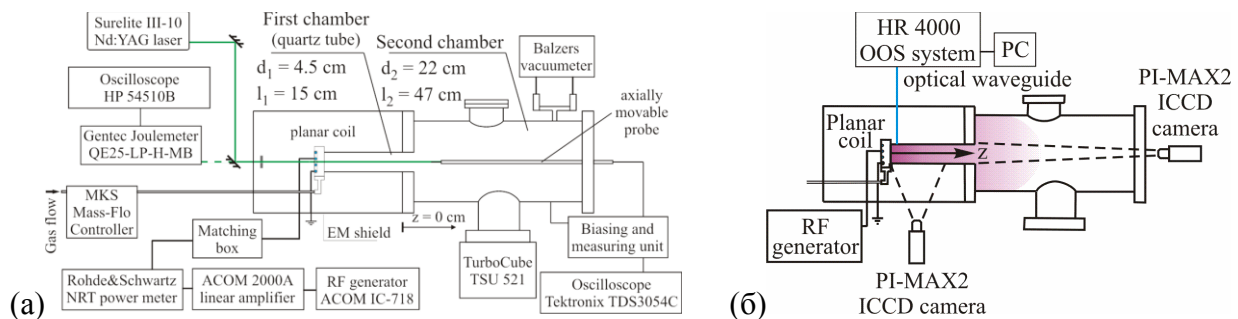
(б) определяне на естеството на капацитивния мод на индуктивния разряд, т.е. на начина и механизмите на поддържането му,

(в) отговор на въпроса дали двукамерната конфигурация на плазмения източник, с наличието на втора камера за плазмено разширение, влияе върху поведението на разряда в първата камера (камерата, където се внася ВЧ мощност).

По отношение на разряд с малък радиус целта е:

(г) експериментално установяване на връзка между пространственото разпределение на плазмения потенциал и концентрацията на отрицателните йони в разряда. Тази връзка е и в основата на концепцията на матричния източник на отрицателни водородни йони (активната част на разряд с малък радиус ((2-3) cm) е ефективен източник на отрицателни водородни йони).

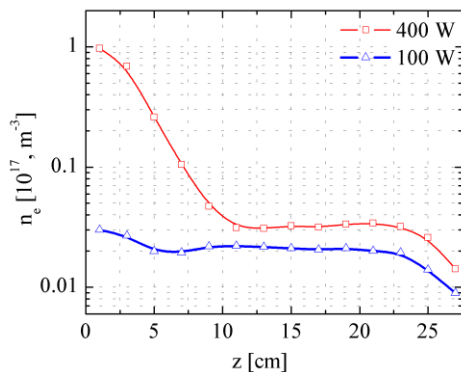
Решаването на тези задачи бе възможно благодарение на едновременното прилагане на три експериментални метода. Комбинирането на сондовата диагностика с метода на оптичната емисионна спектроскопия с фазово разделяне (PROES-метода) даде отговор на първите три въпроса ((а)-(в)), а комбинирането на сондова диагностика с метода на лазерното фотоотделяне – на четвъртия (г).



Фиг. 1. Схема на експерименталната установка: (а) за сондова диагностика и лазерно фотоотделяне и (б) за измерванията по метода на оптичната емисионна спектроскопия с фазово разделяне.

Експерименталната установка заедно със системите за диагностика е представена схематично на Фиг. 1. Първата – по-малка по размер – камера на източника е кварцова тръба с радиус $R_1 = 2.25$ cm и дължина $L_1 = 27$ cm, екранирана с метален екран. Втората камера на източника е също цилиндрична, но метална – от неръждаема стомана, с радиус $R_1 = 11$ cm и дължина $L_1 = 47$ cm. Внасянето на ВЧ мощност (на честота 27 MHz) е чрез плоска спираловидна намотка с 2.5-навивки, монтирана на външната стена на първата камера на източника. Измерванията са при налягане на газа $p = (20 - 60)$ mTorr. При сондовата диагностика е използвана аксиално подвижна единична Ленгмюрова сонда с пасивна компенсация. Представените резултати са за електронна

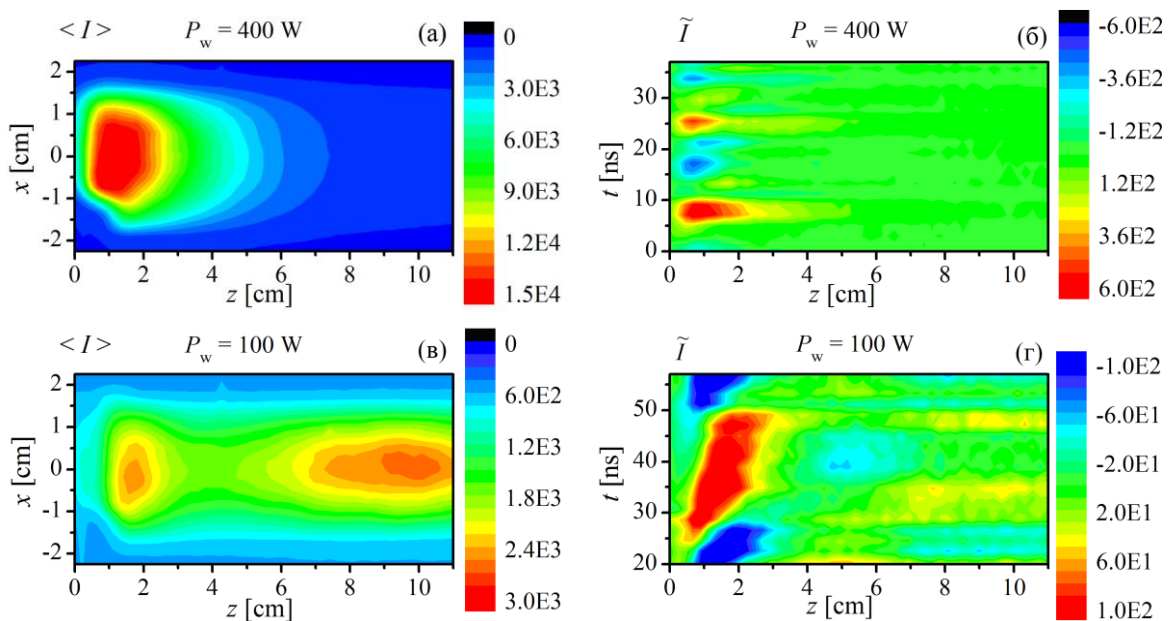
концентрация n_e (определена от йонен ток на насищане по ABR-теорията [6]) и за плазмения потенциал (определен от коляното на сондовите характеристики [5]). При лазерното фотоотделяне в комбинация с единична сонда [7], лазерният сноп и сондата са аксиално ориентирани насрещно един спрямо друг. Получените резултати са за електроотрицателността (отношението на концентрацията на отрицателни йони и концентрацията на електрони) и концентрацията на отрицателните йони (получена с определената – от сондовата диагностика – електрона концентрация). Резултатите от метода на оптичната емисионна спектроскопия с фазово разделяне [8] са за времевото \tilde{I} (в рамките на един период на ВЧ сигнал) и пространствено $\langle I \rangle$ изменение на интензивността на спектралната линията H_α . Времеви изменения на H_α са свързани с поведението на електроните във ВЧ електрично поле в разряда (т.е., определят механизма на нагряване). Пространствените изменения на H_α (получени при осредняване в рамките на един период) описват стационарната структура на разряда (т.е., $\sim n_e$). Регистрирането на сигнала е с бързо-действаща ICCD камера. Заснемането на разряда е при две позиции на камерата (Фиг. 1(б)).



Фиг. 2. Аксиални (z -) изменения (на оста на разряда) на електронната концентрация n_e , получена при двете стойности на приложената – за поддържане на разряда – ВЧ мощност ($P_w = 400$ и 100 W) и налягане $p = 40$ mTorr. Измерените стойности са представени със символи, а кривите са фит към тях.

Резултатите от сондова диагностика (Фиг. 2) и PROES-метода (Фиг. 3), получени в **първата половина на разряда** ($z = (0-13)$ cm), очертават механизмите на поддържането на разряда и начина на внасяне на енергията от ВЧ поле в капацитивен мод (един максимум на \tilde{I} за един периода на ВЧ сигнал [9]) – при сравнително ниска ВЧ мощност, и в индуктивен мод (два максимума на \tilde{I} за един периода на ВЧ сигнал [10]) – при висока ВЧ мощност. **Индуктивният мод се характеризира с Джаулово нагряване на електроните в областта на внасяне на ВЧ мощност в близост до намотката (Фиг. 3(б)) и съответно – с висока плазмена плътност в началото на разряда и спад с отдалечаване от намотката (Фиг. 2 при $P_w = 400$ W и Фиг. 3(а)). Капацитивният мод се характеризира с ниска плазмена плътност (Фиг. 2 при $P_w = 100$ W и Фиг. 3(в)) и две области с различни механизми на внасянето на ВЧ мощност (Фиг. 3(г)): ускоряване на електроните в пристенния слой при неговото**

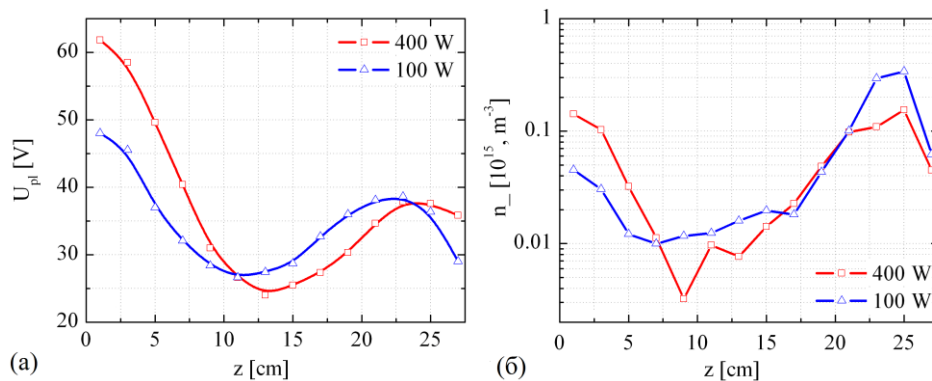
разширяване (електронен сноп при $z = (0-3)$ cm, зареждащ се в пристенния слой по време на първия полупериод на ВЧ поле) и Джаулово нагряване в обема на разряда (двата максимума на \tilde{I} (по един в полупериод) при $z = (6-11)$ cm). При това, получените резултати показват **аналогия на капацитивния мод на разряда с капацитивен разряд**: намотката действа като електрод, а металната предна стена на втората камера на източника е втория електрод на разряда. Доказателство за това е полученият електронен сноп, с неговото движение по дължината на разряда. Това показва, че **E_z -компонентата на ВЧ полето поддържа разряда**, а не E_r -компонентата на полето, породена от потенциален спад между навивките на намотката, както се счита в литературата.



Фиг. 3. Интензивност на регистрираната H_α -спектралната линия откъм страничната стена на разряда. (а) и (в) Двумерно разпределение на усреднената – по периода на ВЧ сигнал – интензивност на H_α -линията $\langle I \rangle$, получено съответно при $P_w = 400$ W и $P_w = 100$ W. Диаметърът на разряда е по оста x . (б) и (г) Интензивността $\tilde{I}(t)$, в рамките на един период на ВЧ сигнал, и аксиалните ѝ изменения, получени съответно при $P_w = 400$ W и $P_w = 100$ W; $p = 40$ mTorr.

Аксиалната структура на електронната концентрация **във втората половина** на разряда, тази – в близост до прехода между двете камери ($z = (13-27)$ cm), е една и съща независимо от мода на разряда, т.е. не се влияе от механизмите на внасяне на ВЧ мощност. **Поведението на разряда** в тази област **се определя от** конструкцията на източника: **наличието на втора – по-голяма по размер – камера** влияе на поведението на разряда в първата камера. Самоорганизацията на разряда, с оглед на намаляване на загубите на заредените частици на стените на втората камера, определя пространствено разпределение на постоянното електрично поле в разряда, с формиране на втори максимум на потенциала му в близост до прехода към втората камера

(Фиг. 4(а)). Тъй като потокът на отрицателните йони в постоянното електрично поле управлява тяхното поведение в разряд с малък радиус – като този, изследван тук – то пространственото разпределение на отрицателните йони (Фиг. 4(б)) следва това на потенциала на постоянното поле (Фиг. 4(а)).



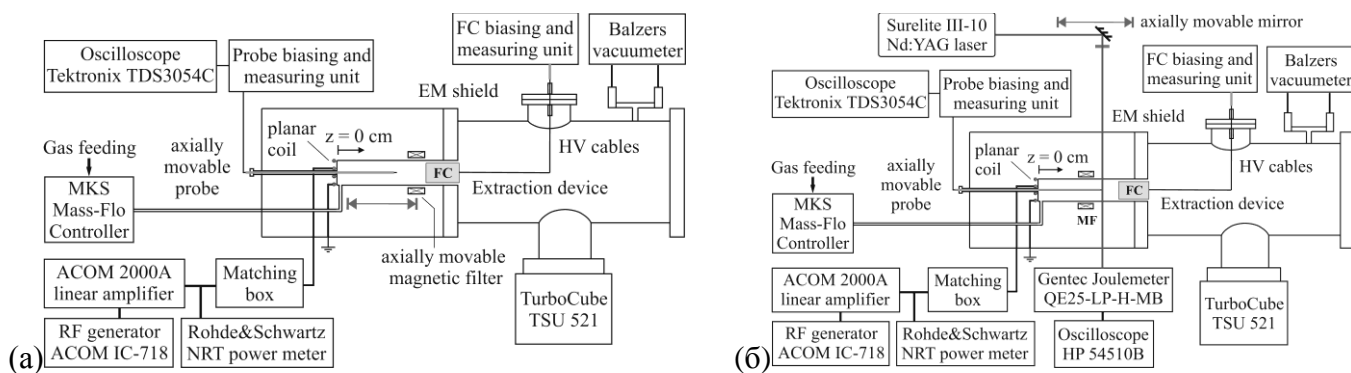
Фиг. 4. Аксиални профили на (а) плазмения потенциал и на концентрацията на отрицателните йони (б) (на оста на разряда) при: двете стойности на абсорбираната мощност ($P_w = 100$ и 400 W) за $p = 40$ mTorr. Измерените стойности са представени със символи, а кривите са фит към тях.

Основните изводи по отношение на индуктивния разряд с плоска намотка са за идентифицирането на двата мода на разряда – индуктивен и капацитивен, като е установено, че **механизмът на поддържане на капацитивния мод е напълно аналогичен на този на капацитивен разряд.**

Основният извод по отношение на разряд с малък радиус е за **експерименталното потвърждаване на теоретичните резултати, на които се основава концепцията за матричния плазмен източник, т.е. натрупването на обемно създадените в разряда отрицателни йони е в областта на максимума на потенциала на постоянното електрично поле, вследствие на потока на йоните в това поле.** Това означава е, че нелокални процеси в разряда определят пространственото разпределение на отрицателните йони, за разлика от утвърдената в литературата концепция за тандемните източници, основаваща се на осигуряване на условия, стимулиращи локалността в разряда.

В **Глава 3** на дисертацията са представени резултати от сондова диагностика [Б1,Г1,Г4] и от диагностика с метода на лазерното фотоотделяне в комбинация със сонда [Б1]. **Измерванията са проведени в единичен елемент на матричен източник:** индуктивен разряд с плоска намотка и малък радиус, комплектуван с устройство за извличане на отрицателни йони. **Целта е получаването на начални резултати за влиянието на потенциала, приложен на плазмения електрод (ПЕ) и на използването на магнитен филтър (МФ) върху условията за извличане на отрицателните водородни йони.** Прилагането на **висок потенциал на ПЕ без МФ** е с оглед на **извличането на**

нелокално акумулираните отрицателни йони посредством „изглаждане” на аксиалния профил на плазмения потенциал, подобно на този в постояннотоков тлеещ разряд. **Използването на МФ** е с оглед на проверка на **традиционния начин за извличане на отрицателните водородни йони** чрез стимулиране на условията за локалното им създаване [11]. В този случай пред ПЕ се образува потенциална яма, а **извличането е на локално създадените отрицателни йони.**

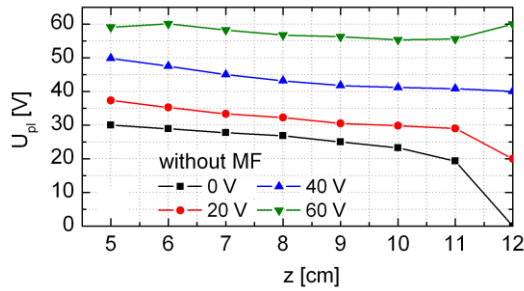


Фиг. 5. Схема на експерименталната установка с представена аранжировка (а) за сондова диагностика и (б) за диагностика по метода на лазерното фотоотделяне в комбинация със сонда.

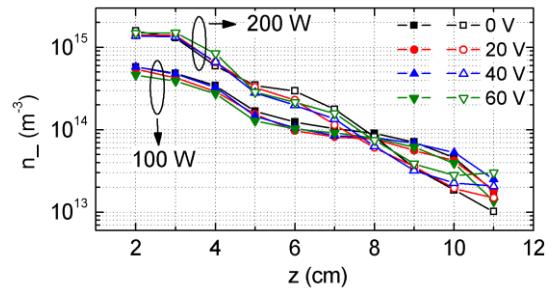
Единичният елемент на матричен източник е формиран посредством поставяне на извличащо устройство в първата камера на източника (Фиг. 5). Дължината на разряда се фиксира от позицията на извличащото устройство – в случая 12 cm. Използваните сондите са подвижни в аксиално направление и екранирани, понеже минават през активната част на разряда. При лазерното фотоотделяне, лазерния сноп преминава радиално на разряда (Фиг. 5(б)). Разрядът е в режим на проток (1.5 sccm), като изпомпването е през апертурите на електродите на извличащото устройство. Плазмените параметри от сондова диагностика и от лазерното фотоотделяне са определени като в Глава 2. Резултатите са получени при различен потенциал на ПЕ и различна аксиална позиция на МФ. Налягането е 6 mTorr, а ВЧ мощности покриват и двата мода на разряда.

Прилагането на висок потенциал на РЕ (60 V) води до „изглаждане” на аксиалния профил на плазмения потенциал (Фиг. 6), което е потенциална възможност за формирането на максимум на концентрацията на отрицателните йони в областта на извличане. Именно това е в основата на разработената в Глава 5 концепция за извличане на йоните, основаваща се на нелокалност, т.е. на контрол на потока им в постоянното поле. Аксиалните изменения на концентрацията на отрицателните водородни йони (Фиг. 7), обаче, са слабо повлияни от приложения потенциал на ПЕ. Очевидно в случая 60 V не е достатъчно висок потенциал за да окаже влияние върху позицията на максимума на n_- , който остава заключен при намотката. Въпреки това,

поддържането на разряда при по-висока ВЧ мощност – в индуктивен мод – осигурява по-висока концентрация на отрицателните йони, което е съществено за експериментите по екстракция на отрицателните йони в Глава 5.

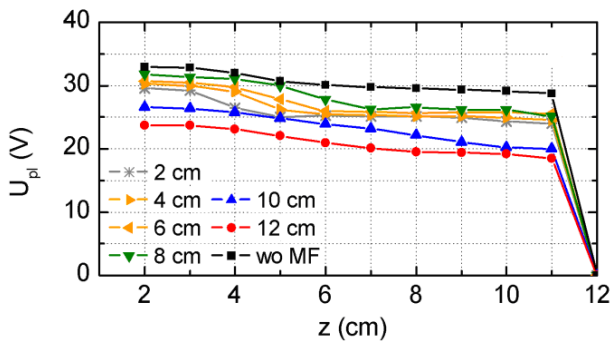


Фиг. 6. Аксиални изменения на плазмения потенциал при различни стойности на потенциали на плазменият електрод (дадени на фигурите); $P_W = 200$ W.

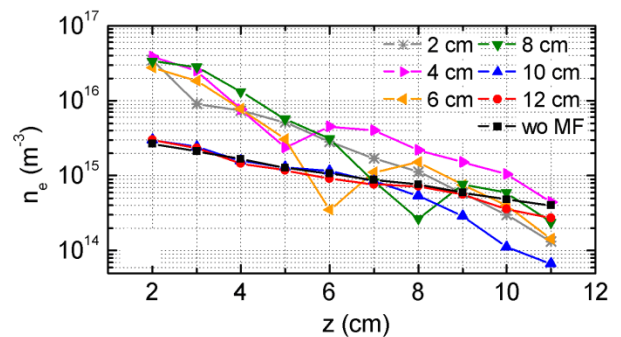


Фиг. 7. Аксиални изменения на концентрацията на отрицателните йони при различни стойности на потенциала, приложен на плазмения електрод в условията на кондензаторен мод ($P_W = 100$ W) и индуктивен мод ($P_W = 200$ W) на разряда.

Внасянето на **МФ** в конфигурацията на разряда (при заземен ПЕ) води до спад в аксиалния профил на плазмения потенциал в областта на филтъра и зад него (Фиг. 8). В резултат на това се формира потенциален бариер и отрицателните остават „заклучени“ в областта при намотката. **Същественният – и нов – резултат тук е за влиянието на МФ върху мода на разряда:** МФ разположен в близост до областта на внасяне на ВЧ мощност води до преход на индуктивния разряд с плоска намотка от кондензаторен в индуктивен мод (въпрос, който прецизно е изследван в [12]). Тук това е показано на Фиг. 9, където електронната концентрация при намотката нараства с повече от порядък.



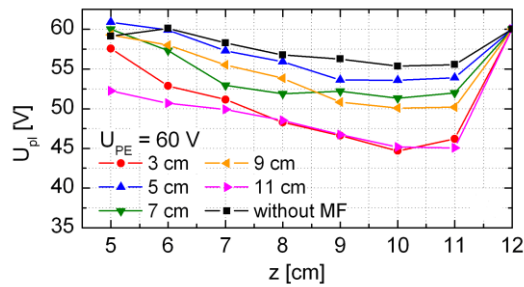
Фиг. 8. Аксиални изменения на плазмения потенциал при различни позиции на магнитния филтър (дадени на фигурите) и заземен плазмен електрод; $P_W = 100$ W.



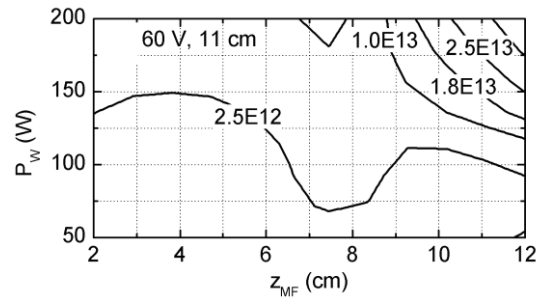
Фиг. 9. Аксиални изменения на електронната концентрация при различни позиции на магнитния филтър (дадени на фигурите) и заземен плазмен електрод; $P_W = 100$ W.

Прилагане на висок потенциал на РЕ при наличието на МФ (Фиг. 10) води до формирането на потенциална яма пред ПЕ, стимулираща извличането на

локално създадените отрицателни йони. Най-висока стойност на концентрацията на отрицателни йони пред ПЕ (на 1 cm от него) се получава, когато МФ е разположен при ПЕ и разряда е в индуктивен мод (Фиг. 11).



Фиг. 10. Аксиални изменения на плазмения потенциал при различни позиции на магнитния филтър (дадени на фигурите); $U_{PE} = 60 \text{ V}$ и $P_W = 200 \text{ W}$



Фиг. 11. Концентрация на отрицателните йони в $[\text{m}^{-3}]$ пред ПЕ ($z = 11 \text{ cm}$) измерена при различна позицията на магнитния филтър и различна приложената ВЧ мощност ($U_{PE} = 60 \text{ V}$).

Резултатите от експериментите проведени в тази Глава **очертavat двете основни насоки за извличане на отрицателните водородни йони**, от единичен елемент на матричен източник: **извличане на нелокално акумулираните отрицателни йони** при изглаждане на аксиалния профил на плазмения потенциал и **извличане на локално създадените йони от потенциалната яма пред ПЕ при наличието на МФ**. И двете насоки за извличане се основават на **прилагането на висок потенциал на ПЕ (над 60 V) и работа на разряда при висока ВЧ мощност – в индуктивен мод.**

В Глава 4 на дисертацията теоретично е изследвано **влиянието върху разряда на Лемгмюрова сонда**, внесена в индуктивен разряд с малък радиус при ниско налягане [A2,G3]. Това е направено с оглед на прилагането на сондова диагностика в експериментите върху единичен разряд на матричния източник (Глави 3 и 5), при които е използвана аксиално подвижна (по оста на разряда) сонда, минаваща през намотката, т.е. през областта на внасяне на ВЧ мощност. **Целта е да се определи до каква степен сондата влияние върху структурата на разряда.** Както е известно, общоприетото предположение при сондовата диагностика е, че поради екранирането на потенциала, подаден на сондата, смущенията на плазмените параметри, предизвикани от сондата, са само в областта на слоя около сондата.

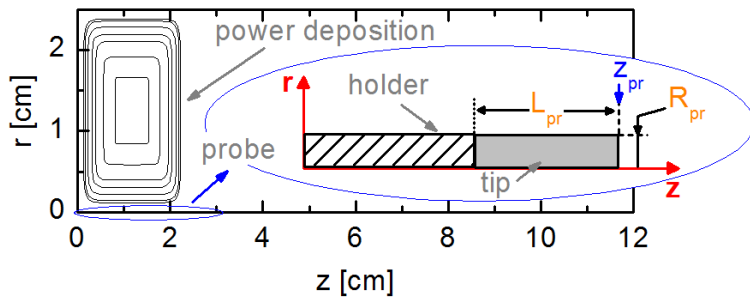
С оглед на целта е разработен модел на разряд със сонда, като резултатите от него са сравнени с резултати за пространственото разпределение на плазмените параметри в същия разряд, но без поместена в него сонда. Анализът на получените резултати включва:

(а) Определяне на влиянието на сондата върху структурата на разряда, т.е. върху пространственото разпределение на плазмените параметри при различни позиции на сондата и различен потенциал, приложен на сондата;

(б) Определяне на грешката, която се внася поради промените в структурата на разряда, дължащи се на сондата, при получаване на плазмените параметри от теоретични сондови характеристики;

(в) Определяне на ролята на налягането на газа в модификациите на структурата на разряда, дължащи се на поместването на сонда в него.

Анализът на резултатите включва и проверка на точността на модела относно описанието на слоя около сондата.



Фиг. 12. Област на моделиране: половината от газоразрядната тръба със сонда, поставена на оста на разряда ($r = 0$). Радиусът на държача, както и този на сондата, е $R_{pr} = 0.3 \text{ mm}$; дължината на сондата е $L_{pr} = 6 \text{ mm}$. Позицията z_{pr} на сондата отговаря на края ѝ (на върха ѝ).

Разглеждаме индуктивен разряд във водород с плоска намотка, поддържан при ниско налягане. Пръстеновидната форма на внасянето на ВЧ мощност Q_{ext} в разряда е симулирана със супер-Гаусов профил (Фиг. 12). Разрядът се поддържа в цилиндрична тръба с радиус $R = 2.25 \text{ cm}$ и дължина $L = 12 \text{ cm}$. Държачът на сондата е диелектрична тръба с радиус 0.3 mm . Сондата е със същия радиус ($R_{pr} = 0.3 \text{ mm}$) и с дължина $L_{pr} = 6 \text{ mm}$ (Фиг. 12). Потенциалът, приложен на сондата (спрямо металните стени на разряда) е променян от $U_{pr} = -80 \text{ V}$ до стойност 10 V над плазменния потенциал, в областта около сондата.

Моделът се основава на флуидните уравнения [13] и е двумерен с аксиална симетрия. Изходната система уравнения включва уравнението за непрекъснатост на електроните ($\alpha = e$), на положителните водородни йони ($\alpha = j$ с $j = 1, 2$ и 3 , съответно за H^+ , H_2^+ и H_3^+ -йоните) и на водородните атоми ($\alpha = a$)

$$\text{div} \Gamma_{\alpha} = \frac{\delta n_{\alpha}}{\delta t}, \quad (1)$$

уравнението за баланс на енергията на електроните

$$\text{div} \mathbf{J}_e = Q_{ext} + P_{coll}, \quad (2)$$

уравнението на Поасон

$$\Delta\Phi = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left(\sum_{j=1}^3 n_j - n_e \right) \quad (3)$$

и уравнението за състоянието

$$p = k_B T_g (n_a + n_m), \quad (4)$$

от което се определя концентрацията на водородните молекули n_m .

В (1)-(4) Γ_α и \mathbf{J}_e са съответно потоците на частиците и потока на енергията на електроните, $\delta n_\alpha / \delta t$ и P_{coll} описват създаването и загубата на частиците и загубата на енергия на електроните при удари, Φ е плазмения потенциал, а p и T_g са съответно налягането на газа и газовата температура; e , ε_0 и k_B са елементарния електричен заряд, диелектричната проницаемост на вакуума и константата на Болцман.

Електронния поток е дрейфово-дифузионен поток, включващ и термодифузионния поток:

$$\Gamma_e = b_e n_e \nabla \Phi - D_e \nabla n_e - D_e^T n_e \frac{\nabla T_e}{T_e}, \quad (5)$$

където $b_e = e / m_e \nu_{\text{en}}$, $D_e = T_e / m_e \nu_{\text{en}}$ и $D_e^T \equiv D_e^T$ са съответно подвижността на електроните и коефициентите им на дифузия и термодифузия; T_e и n_e са електронната температура и концентрация, m_e е масата на електрона, а $\nu_{\text{en}} = \nu_{\text{ea}} + \nu_{\text{em}}$ – честотата на еластични удари на електроните с атоми (ν_{ea}) и молекули (ν_{em}). Скоростните константи на еластичните и нееластичните удари в P_{coll} и $\delta n_\alpha / \delta t$ са пресметнати с Максвелова функция на разпределение на електроните по енергии [14].

При моделиране на разряди при ниско налягане е необходимо да се отчете и инерциония член в уравнението за движение на йоните. Поради това йонните потоци

$$\Gamma_{j(r,z)} = b_{j(r,z)}^{\text{eff}} n_j \partial_{(r,z)} \Phi - D_{j(r,z)}^{\text{eff}} \partial_{(r,z)} n_j \quad (6)$$

са дефинирани с ефективни подвижности $b_{j(r,z)}^{\text{eff}} = e / (m_j \nu_{j(r,z)}^{\text{eff}})$ и ефективни коефициенти на дифузия $D_{j(r,z)}^{\text{eff}} = T_j / (m_j \nu_{j(r,z)}^{\text{eff}})$, включващи ефективни честоти на удари

$$\nu_{j(r,z)}^{\text{eff}} = \sum_{\beta=a,m} \frac{m_\beta}{m_j + m_\beta} \nu_j^{\text{el}} + \nu_{j(r,z)}^{\text{iner}}. \quad (7)$$

В (6) и (7), n_j и m_j са съответно концентрацията и масата на йоните, а $T_j = T_g$ е тяхната температура. Първият член в уравнение (7) описва еластичните удари йони-неутрали, а вторият член $\nu_{j(r,z)}^{\text{iner}} = \partial \nu_{(r,z)} / \partial (r,z) = -\sqrt{e / m_j} \left(\partial_{(r,z)} \Phi / \sqrt{\Phi_{\text{max}} - \Phi} \right)$ отчита инерциония член в уравнението за движение на йоните [15].

Потоците на водородните атоми е дифузионен поток

$$\Gamma_a = -D_a \nabla n_a, \quad (8)$$

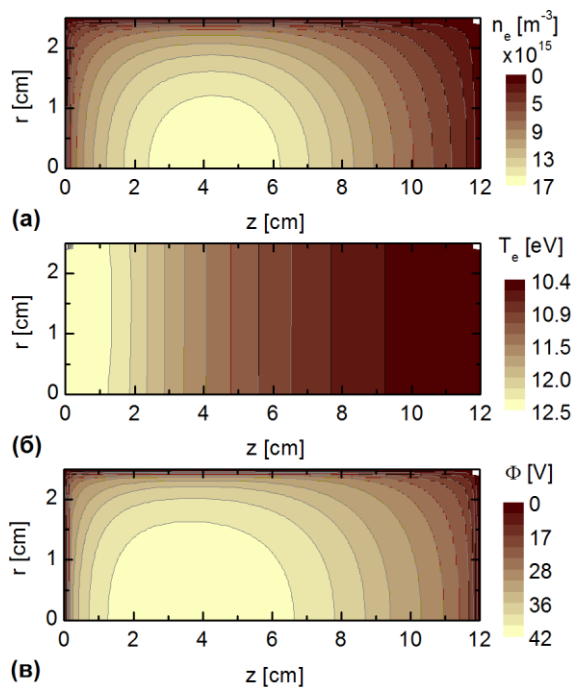
където D_a е коефициента им на дифузия.

Граничните условия на стените [16,17] са за нормалните компоненти на потоците на електроните, йоните и на енергията на електроните: $\Gamma_e^{\text{wall}} = (1/4)n_e v_{e,\text{th}}$, $\Gamma_{j(r,z)}^{\text{wall}} = (1/2)n_j v_{j,\text{th}} + b_{j(r,z)}^{\text{eff}} n_j |E_{(r,z)}^{\text{wall}}|$ и $J_e^{\text{wall}} = (5/2)T_e \Gamma_e^{\text{wall}}$; $v_{e,\text{th}}$ и $v_{j,\text{th}}$ са топлинните скорости съответно на електрони и йони; $E_{(r,z)} = -\partial_{(r,z)} \Phi$ е постоянното електрично поле в разряда. Граничните условия за уравнението на Поасон са: (а) нулев потенциал ($\Phi^{\text{wall}} = 0$ V) на металните стени, (б) равенство на електронния и йонния поток, водещо до $\partial_r \Phi^{\text{holder}} = [(1/4)n_e v_{e,\text{th}} - (1/2)\sum_j n_j v_{j,\text{th}}] / \sum_j n_j b_j^{\text{eff}}$ на диелектричната стена на държача на сондата, и (в) потенциал $\Phi^{\text{tip}} = U_{\text{pr}}$, приложен на сондата спрямо металните стени. Граничното условие за електроните на повърхността на сондата е същото, като за метални стени. Същото се отнася и за йоните, когато са в ускоряващо поле. В случая на задържащо поле, граничното условие за йоните е $\Gamma_{j(r,z)}^{\text{wall}} = (1/2)n_j v_{j,\text{th}}$. На оста на разряда граничното условие е за аксиална симетрия ($r = 0$).

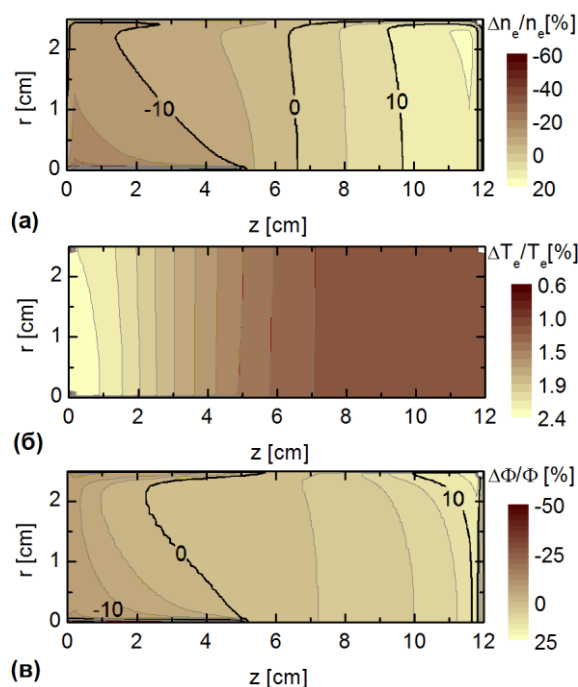
Получените резултати от модела са за двумерното разпределение на електронната концентрация n_e и температура T_e и на плазменият потенциал Φ . Тъй като измененията, дължащи се на сондата, не са големи, визуализацията на промените в пространственото разпределение на плазмените параметри е чрез относителното им отклонение

$$\frac{\Delta \Theta_k}{\Theta_k} = \frac{(\Theta_k)_{\text{with probe}} - (\Theta_k)_{\text{w/o probe}}}{(\Theta_k)_{\text{w/o probe}}} \quad (9)$$

от стойностите без сонда в разряда (където Θ_k е означение за n_e , T_e , и Φ). Основните резултати са получени при налягане $p = 10$ mTorr, като накратко са коментирани и резултати при сравнително по-високо налягане ($p = 50$ mTorr). Внесената за поддържане на разряда ВЧ мощност е $P_{\text{ext}} = 50$ W ($P_{\text{ext}} = \int_{(V)} Q_{\text{ext}} dV$, където V е обема на плазмата).

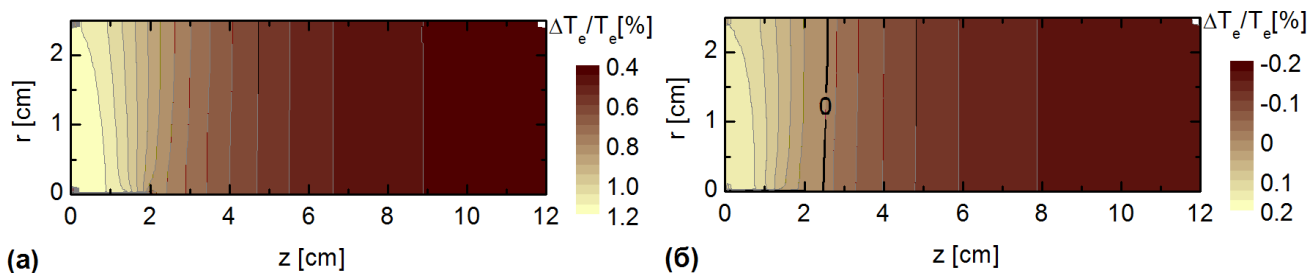


Фиг. 13. Пространственото разпределение на електронната концентрация (а) и температура (б) и на плазмения потенциал (в) без сонда в разряда; налягане на газа $p = 10 \text{ mTorr}$

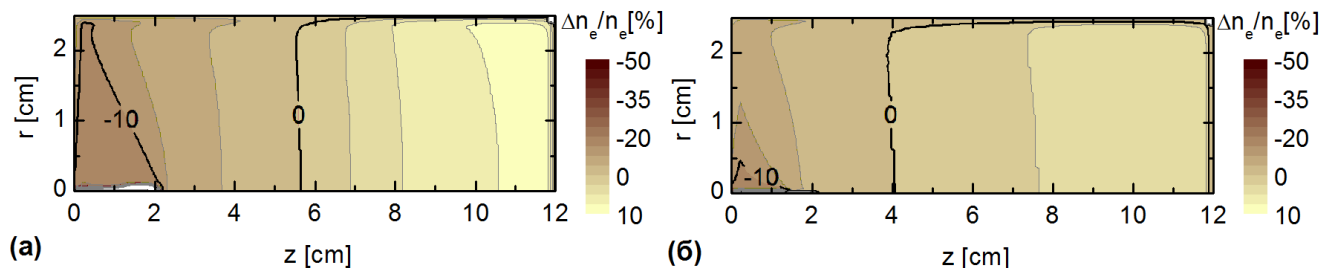


Фиг. 14. Относителни отклонения в пространственото разпределение на електронната концентрация $\Delta n_e/n_e$ (а) и температура $\Delta T_e/T_e$ (б) и на плазмения потенциал $\Delta \Phi/\Phi$ (в), породени от сондата; сондата е при $z_{\text{pr}} = 5 \text{ cm}$ с приложен на нея плаващ потенциал ($U_{\text{pr}} = U_{\text{fl}} = 19 \text{ V}$); $p = 10 \text{ mTorr}$.

Резултатите на Фиг. 13 за пространственото разпределение на плазмените параметри (електронна концентрация и температура и плазмен потенциал) **в разряд без сонда** показват типичната структура на индуктивен разряд с плоска при ниско налягане: Висока електронна температура и максимум на електронната концентрация и на плазмения потенциал в областта до намотката и област на разширяваща се плазма, характеризираща се със спад на плазмените параметри.

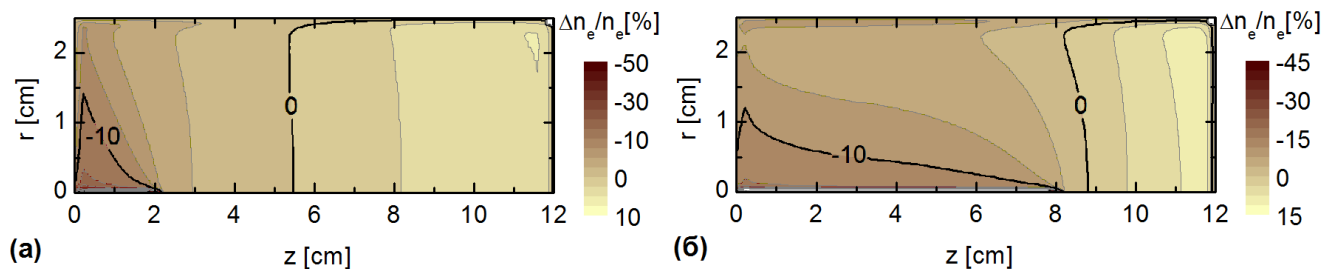


Фиг. 15. Относителни отклонения в пространственото разпределение на електронната температура $\Delta T_e/T_e$, получено при позиция на сондата $z_{\text{pr}} = 2 \text{ cm}$ и различни стойности на потенциала, приложен на сондата: (а) $U_{\text{pr}} = -80 \text{ V}$ и (б) $U_{\text{pr}} = 44.5 \text{ V}$; $p = 10 \text{ mTorr}$.



Фиг. 16. Същото като при Фиг. 11, но за електронната концентрация.

Влиянието на държача и сондата върху като външно тяло внесено в разряда (Фиг. 14) е при сонда на плаващ потенциал ($U_{pr} = U_{fl}$). Резултатите показват, че нарастването, макар и слабо, на електронната температура, дължащо се на увеличените загуби на заредени частици на допълнителната стена, внесена в разряда (държача на сондата), водят до преразпределение на плътността на плазмата и на плазмения потенциал. Контурът $\pm 10\%$ показва, че електронната концентрация нараства пред сондата и намалява зад нея, като най-големите отклонения са локализирани при държача. Плазменият потенциал показва същата тенденция на изменение, като тези на електронната концентрация, но промените са по-слабо изразени.

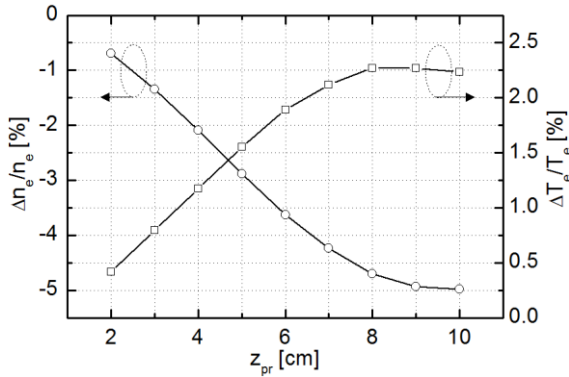


Фиг. 17. Относителни отклонения в пространственото разпределение на електронната концентрация $\Delta n_e/n_e$ при приложен на сондата плаващ потенциал ($U_{pr} = U_{fl} = 19$ V) при $z_{pr} = 2$ cm (а) и $z_{pr} = 8$ cm (б); $p = 10$ mTorr.

Промените в дифузионния и дрейфов поток на електроните, дължащи се на възникналите в пространственото разпределение на концентрацията на електроните и на плазмения потенциала градиенти в радиално направление, когато на сондата се приложи потенциал от областите на електронен и йонен ток на насищане от сондовата характеристика, води до допълнителни промени в загубите на заредените частици и въвежда допълнителни промени в структурата на целия разряд (Фиг. 15 и 16). **Потенциал $U_{pr} = -80$ V** (Фиг. 15(a) и 16(a)), приложен на сондата, който е от участъка на йонен ток на насищане на сондовата характеристика, влияе по-силно на поведението на плазмата отколкото потенциал $U_{pr} = 44.5$ V (Фиг. 15(б) и 16(б)) (контурът 0% при T_e и -10% при n_e).

С преместване на сонда по оста на разряда, се премества и цялата картина на относителните изменения на плазмените параметри (Фиг. 17). При това, както показва

Фиг. 18, допълнителните загуби на стените на разряда, внесени от сондата нарастват. Като цяло, обаче, промените в електронната температура и концентрация са малки: до 2.25% за ΔT_e и до 5% за Δn_e .

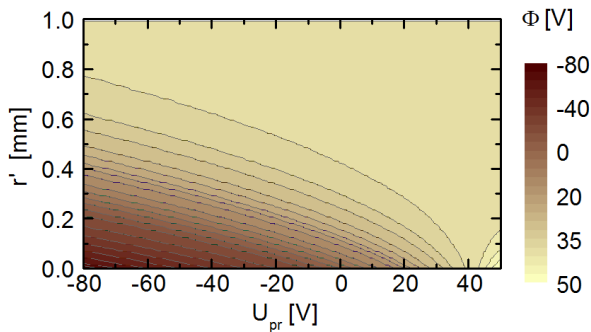


Фиг. 18. Относителни промени в електронната концентрация и температура при различни позиции на сондата, получени чрез усредняване по целия обем V на разряда:

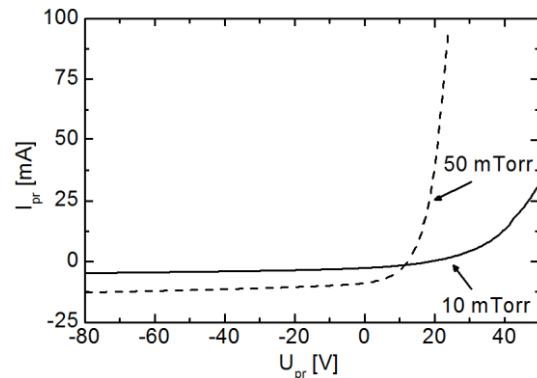
$$\frac{\Delta \Theta_k}{\Theta_k} = \frac{\int_{(V)} (\Theta_k)_{\text{with probe}} dV - \int_{(V)} (\Theta_k)_{\text{w/o probe}} dV}{\int_{(V)} (\Theta_k)_{\text{w/o probe}} dV}; \text{ сондата}$$

е на плаващ потенциал.

Съществен въпрос е доколко флуидният модел адекватно описва **слоя около сондата**. Радиалните изменения на плазмения потенциал около сондата (Фиг. 19) показват, че: с нарастване на потенциала от -80 V до плазмения потенциал, дебелината на слоя от некомпенсиран положителен заряд плавно спада до нула. След това започва формирането на слой от некомпенсиран отрицателен заряд. При това, в преходния участък на теоретичните ВАХ (Фиг. 20), разпределението на електроните в слоя е Болцманово.

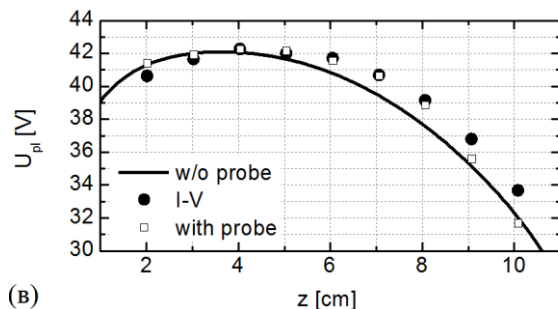
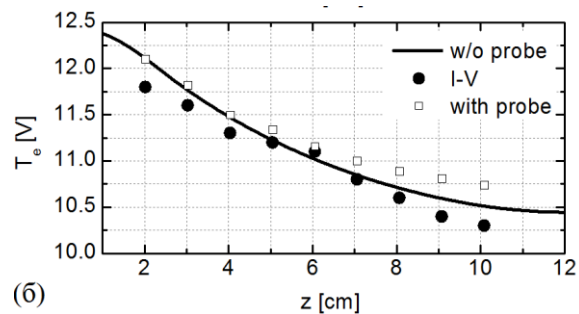
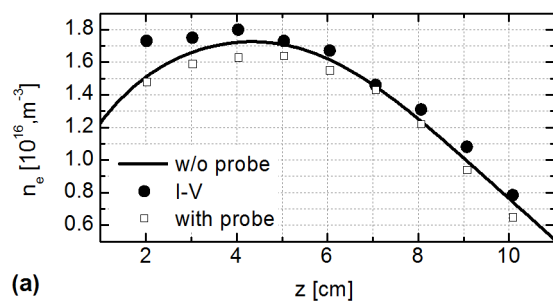


Фиг. 19. Радиално изменение на плазмения потенциал Φ с промяната на потенциала, приложен на сондата; $z_{\text{pr}} = 5 \text{ cm}$. Представените радиални изменения са при $z = 4.7 \text{ cm}$, т.е. в средата по дължината на сондата, а $r' = 0$ е на повърхността на сондата; $p = 10 \text{ mTorr}$.



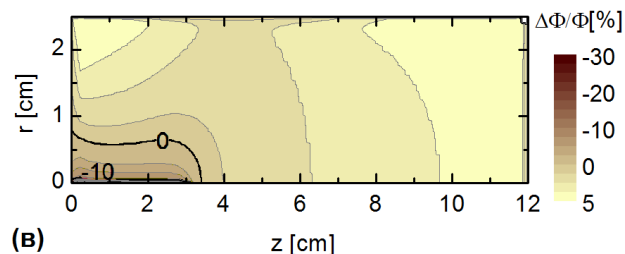
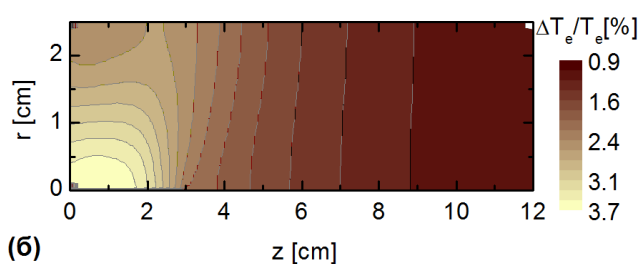
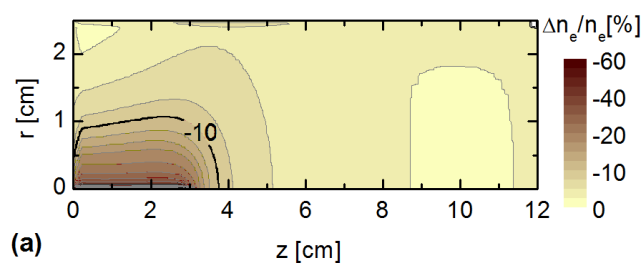
Фиг. 20. Теоретични сондови характеристики, получени от модела при $p = 10$ и 50 mTorr .

Сравняването на резултатите от модела със и без сонда и резултати, получени от обработката на теоретичните сондови характеристики (Фиг. 20) показва, че различията при електронната температура и плазмения потенциал са съответно в рамките на 3 и 5%, а при електронната концентрация - 10% (Фиг. 21).



Фиг. 21. Аксиални изменения на оста на разряда ($r = 0$) на електронната концентрация (а) и температура (б) и на плазения потенциал (в), получени от модел без сонда (пътните криви) и модел със сонда (празните квадратчета). Резултатите, отговарящи на плазмените параметри, получени от обработка на сондовите характеристики, са дадени с пълтни точки; $p = 10$ mTorr.

Нарастването на **налягането на газа**, като цяло, води до локализиране на промените в плазмените параметри около сондата (Фиг. 22 сравнена с Фиг. 14).

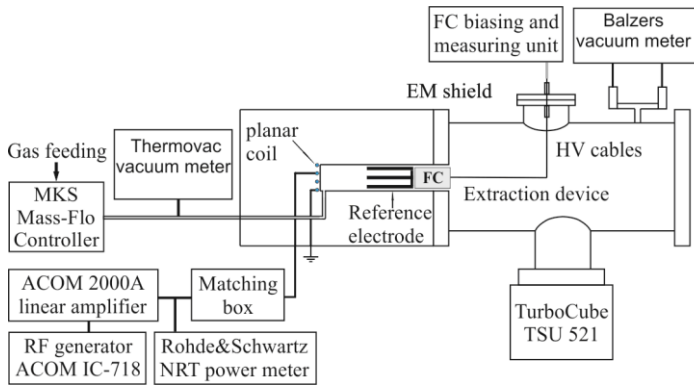


Фиг. 22. Относителни отклонения в пространственото разпределение на електронната концентрация $\Delta n_e/n_e$ (а) и температура $\Delta T_e/T_e$ (б) и на плазения потенциал $\Delta\Phi/\Phi$ (в), дължащи се на сондата, при налягане на газа $p = 50$ mTorr; позиция на сондата $z_{pr} = 3$ cm; сондата е на плаващ потенциал ($U_{pr} = U_{fl} = 12$ V).

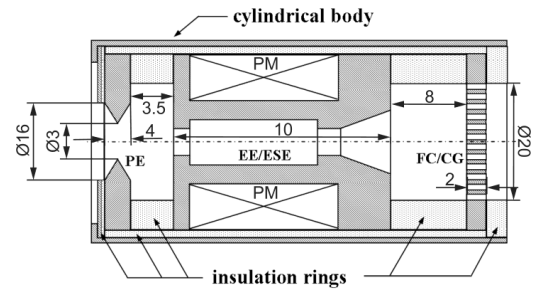
Основният изводът в Глава 4 е, че при определяне на точността на резултатите от сондова диагностика трябва да се добави грешка от около 10%, дължаща се на изменение на поведението на плазмата, породено от сондата.

Глава 5 представлява **експериментални** [Б2, В1, Г2] и **теоретични** [Б3] изследвания върху **извличането на отрицателни водородни йони от единичен елемент на матричен плазмен източник**. В нея са включени **начални експерименти**, които освен ориентация в проблема, очертават и насоката за извличането на отрицателните йони – **извличане на нелокално формираните йони чрез подаването на висок потенциал на ПЕ**. Концепция, която е изследвана детайлно посредством **двумерен флуиден модел**. В последната част на тази Глава са представени

експериментални резултати от диагностика на плазмата в областта на извличане на йоните в условията на екстракция, потвърждаващи резултатите от модела, както и **резултати за извлечените токове в двата мода на разряда.**

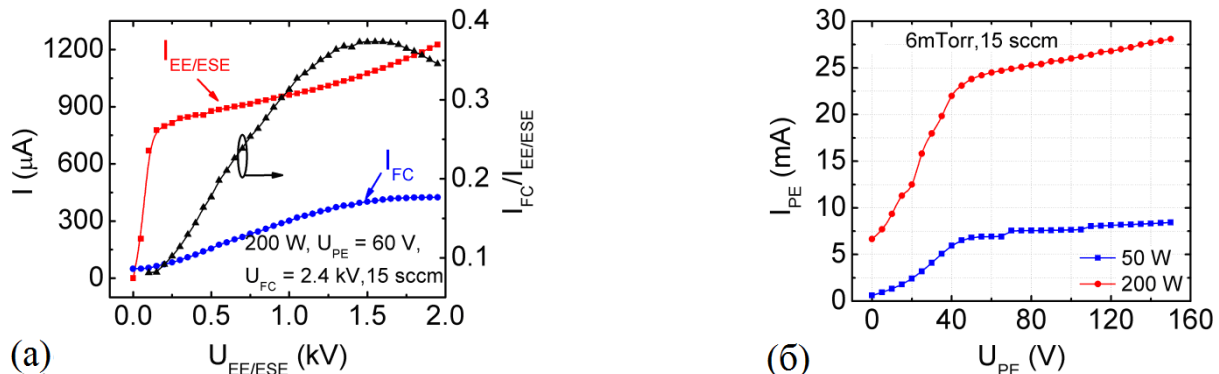


Фиг. 23. Схематично представяне на експерименталната установка



Фиг. 24. Схематично представяне на извличащото устройство (ED). Размерите са в милиметри.

Експерименталната установка (Фиг. 23) е в конфигурацията на единичен елемент на матричен източник. **Извличащото устройство** (Фиг. 24) е три-електродна моноапертурна система, подобна на LAG-системата в източника ВАТМАН. Първият електрод на системата е ПЕ, който е в контакт с плазмата и определя пълният извлечен ток в системата. Вторият електрод е извличащия електрод, който е с постоянни магнити за отклоняване на извлечените електрони. Този електрод е колектор на извлечения електронен ток. Третият електрод е колектор на извлечените отрицателни йони. Подаването на потенциал на електродите е спрямо опорен електрод поместен в първата камера на разряда. С оглед на съпоставяне на резултатите от екстракция с резултати за други източници е използвана плътността на тока.



Фиг. 25. (а) Зависимост на токовете $I_{EE/ESE}$ на втория (EE/ESE) и I_{FC} на третия (FC/CG) електроди на извличащото устройство, както и на тяхното отношение $I_{FC}/I_{EE/ESE}$ от потенциала приложен на втория електрод при $P_W = 200$ W. (б) Волт-амперни характеристики на PE при $P_W = 50$ W и $P_W = 200$ W.

Началната работа по екстракция включва **определяне на оптималните потенциали** на електродите. Това е направено въз основа на токовете на насищане в

снетите ВАХ при потенциал на третия електрод 2.4 kV и апертура на ПЕ 3 mm (заради ограниченията по ток във високоволтовите захранвания). Получените резултати (Фиг. 25) показват, че: потенциалът на ПЕ трябва да е над плазмения потенциал в обема на разряда; 1.5 kV на извличащия електрод осигурява насищане в пълния извлечен ток, а потенциала на третия електрод е достатъчно висок за да отдели извлечените отрицателни йони. При тези измервания най-високата стойност на плътността на извлечения ток от отрицателни йони е 56.9 A/m^2 .

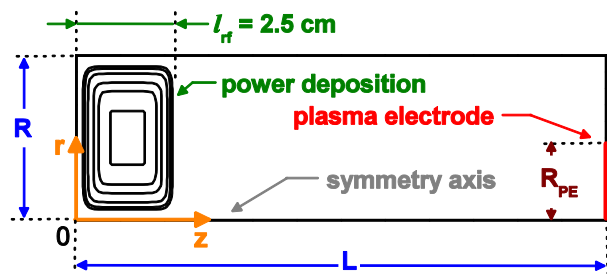
Следващият етап от експериментите цели **определяне на посоката за извличане на отрицателните йони**: (а) извличане на нелокално акумулирани йони чрез подаване на висок потенциал на ПЕ и (б) извличане на локално акумулираните йони пред ПЕ при съвместното действие на МФ и висок потенциал на ПЕ. Насоки, които са формулирано в Глава 3. Трудността на работата в първата насока е в това, че е необходимо да се въздейства върху вътрешен параметър на разряда – аксиалния профил на плазмения потенциал. Тъй като в индуктивни разряди с плоска намотка максимумът на плазмения потенциал е в близост до намотката, нелокалното акумулиране на йоните е именно в тази област. Необходимо е да се отмести максимумът на плазмения потенциал в близост до извличащата система или да се стимулира формирането на втори максимум на потенциала там. Трудността на работата във втората насока е в това, че по начало магнитното поле води до спада на плазмения потенциал в индуктивните разряди с плоска намотка в областта на разширяваща се плазма, т.е. извън областта на внасяне на ВЧ мощност. Това означава, че на основния и голям максимум на концентрацията на отрицателните йони, който е в близост до намотката, т.е. далече от областта на извличането им, не може да се разчита. В този случай може да се разчита единствено на извличане на локално създадени йони в областта на магнитния филтър.

В рамките на двете насоки са **проверени и различни фактори** влияещи върху извличането на отрицателните йони: дължина на разряда, мод, потенциал на ПЕ, площ на опорния електрод и големина на магнитното поле пред плазмения електрод, което изтича от извличащата система.

Получените резултати показват, че за **извличане на нелокално акумулираните йони** е необходим висок потенциал на ПЕ и избягване на проникването на магнитното поле от втория електрод в плазмата. Най-високата измерена стойност на плътността на извлечения ток от отрицателни йони – 72 A/m^2 – е при разряд с дължина 12 cm, голяма площ на опорния електрод, слабо проникване в плазмата на магнитното поле на магнитите във втория електрод на извличащото устройство и индуктивен мод. При **наличието на МФ**, най-високата стойност на плътността на извлечения ток от отрицателни йони е при същите газоразрядни условия но е по-ниска – $(52-66) \text{ A/m}^2$.

Изводът, е че извличането на нелокално акумулираните отрицателни водородни йони е по-ефективно.

Следващата част на Глава 5 представя **двумерен модел**, основаващ се флуидната теория на плазмата, **на единичен разряд от матричен източник**. Моделът е разработен **съгласно концепцията за извличане на нелокално акумулираните отрицателни йони** чрез подаване на висок потенциал на ПЕ. **Първоначалната цел** при разработването на модела бе **анализ на условия, които осигуряват подходящ – за извличане на отрицателните йони – профил на потенциала на постоянното поле в разряда**. С оглед на това, дължината на разряда, абсорбираната ВЧ мощност, потенциалът, приложен на плазмения електрод, както и неговата площ са външните параметри, които се променят при анализа на резултатите.



Фиг. 26. Област на моделиране.

Моделът е двумерен с азимутална-симетрия. Областта на моделиране (Фиг. 26) е половината от газоразрядна тръба с радиус $R = 2.5$ cm и дължина L . Локализираното внасяне на ВЧ мощност на индуктивен разряд с плоска намотка е симулирано посредством тороидален профил на плътността Q_{rf} на ВЧ мощност (с характерен размер в аксиално направление $l_{rf} = 2.5$ cm). Дължината на разряда L се определя от позицията плазмения електрод PE, чиято площ се определена от радиуса му R_{PE} .

Моделът е флуиден, за разряд във водород при ниско налягане. Частиците, отчетени в модела, са: електрони ($\alpha = e$), трите вида положителни йони ($\alpha = j$, където $j = 1, 2, 3$ са означени H^+ , H_2^+ и H_3^+ йоните), отрицателните йони H^- ($\alpha = n$), водородните атоми H ($\alpha = a$) и молекули H_2 ($\alpha = m$) (в основно състояние и в четирнадесетте вибрационно възбудени състояния ($\alpha = m(v)$, с $v = 1 - 14$) на водородната молекула), включени в модела с оглед на описание на обемното създаване на отрицателните водородни йони.

Исходната система уравнения включва уравненията за баланс на всички видове частици, уравнението за баланс на енергията на електроните, уравнението на Поасон и уравнението на състоянието:

$$\text{div}\Gamma_{\alpha} = \frac{\delta n_{\alpha}}{\delta t}, \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{J}_e = Q_{\text{rf}} - P_{\text{coll}} + Q_{\text{dc}}, \quad (11)$$

$$\Delta \Phi = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left(\sum_{j=1}^3 n_j - n_e - n_n \right), \quad (12)$$

$$p = k_B T_g \left(n_a + n_m + \sum_{v=1}^{14} n_{m(v)} \right), \quad (13)$$

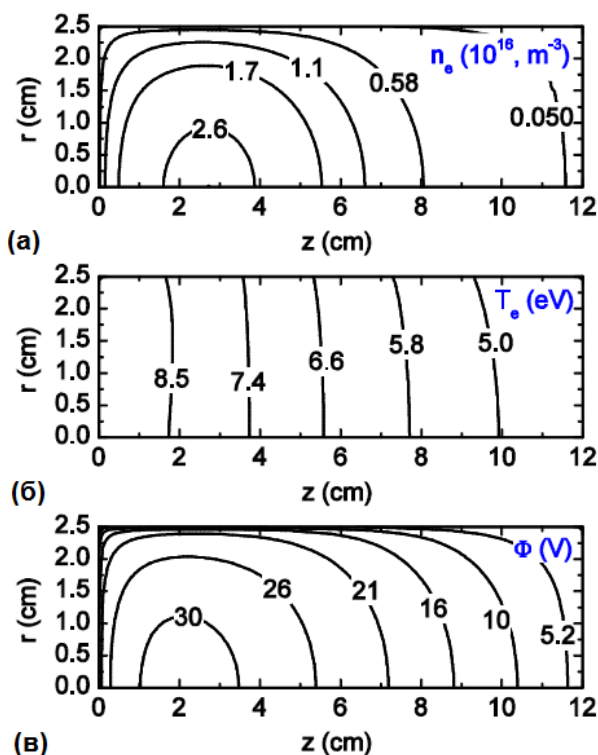
където n_α са плътностите на частиците, e , ε_0 и k_B са съответно елементарния заряд на електрона, диелектричната проницаемост на вакуума и константата на Болцман; p и T_g са налягането и температура на газа. Процесите за създаване и загуба на частици, са същите като тези от [18]. Потоците на заредените частици (Γ_e , Γ_j и Γ_n) са дрейвофодифузионни, като в потока на електроните е отчетена и термо-дифузията. Както в Глава 4, така и тук разрядът е при ниско налягане в режим на свободен пробег, което налага отчитане на инерционния член в уравненията за движение на положителните йони и съответно в потоците им [15].

Във връзка с двата начина на внасяне на мощност в разряда, уравнението за баланса на енергията на електроните е разгледано по-подробно. Потокът на енергията на електроните \mathbf{J}_e , включва топлинен и конвективен поток, както и загубата на енергията на електроните при удари (P_{coll}). Последният член в (11) – $Q_{\text{dc}} = -e\Gamma_e \cdot \mathbf{E}_{\text{dc}}$, където $\mathbf{E}_{\text{dc}} = -\nabla \Phi$ е постоянното електрично поле, а Φ е потенциала му – обикновено се явява като загуби за поддържане на постоянното поле в разряда. Обаче, както е показано [19], той може да се яви също и като приток на енергия. Тук, с високия потенциал, приложен на плазмения електрод, този член отчита внесена в разряда постоянно токова мощност Q_{dc} .

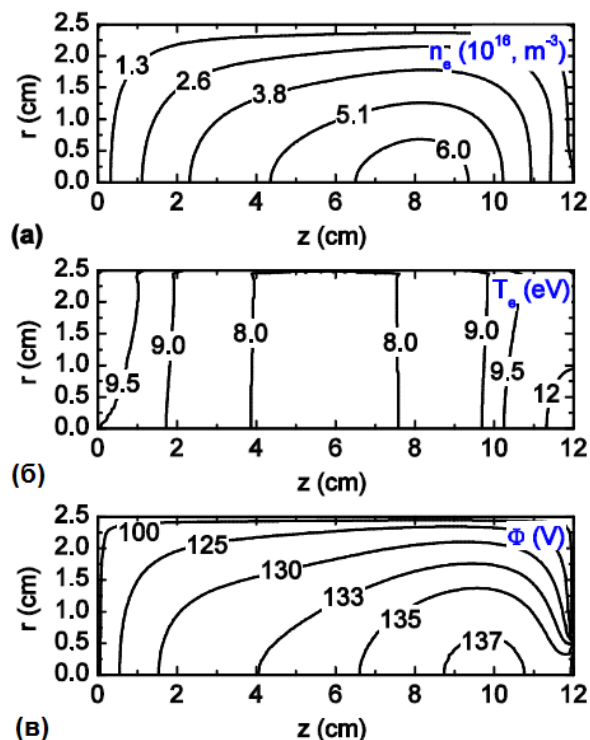
Граничните условия са за азимутална симетрия на оста на разряда ($r = 0$) и за потоци на стените на разряда [16,17] (същите, като в Глава 4 на дисертацията). Рекомбинационните загуби на атоми и деактивирането на вибрационно-възбудени молекули на стените са също отчетени. Граничното условие на плазмения електрод е за потенциала U_{PE} , който му е приложен, спрямо заземените стени на разряда.

Представените резултати са за налягане $p = 20 \text{ mTorr}$ и $T_g = 300 \text{ K}$. Абсорбираната ВЧ мощност $P_{\text{rf}} = (50, 500) \text{ W}$, дължината на разряда $L = (4, 12) \text{ cm}$, потенциалът на плазмения електрод $U_{\text{PE}} = (0-200) \text{ V}$, както и радиусът му $R_{\text{PE}} = (6-14) \text{ mm}$, са външните параметри в модела.

На Фиг. 27 е представена структура на разряда при заземен плазмен електрод ($U_{\text{PE}} = 0 \text{ V}$): висока електронна температура T_e и максимуми на електронната концентрация n_e и на плазмения потенциал Φ в областта на внасяне на ВЧ мощност и спад на T_e , n_e и Φ в областта на разширяваща се плазма.



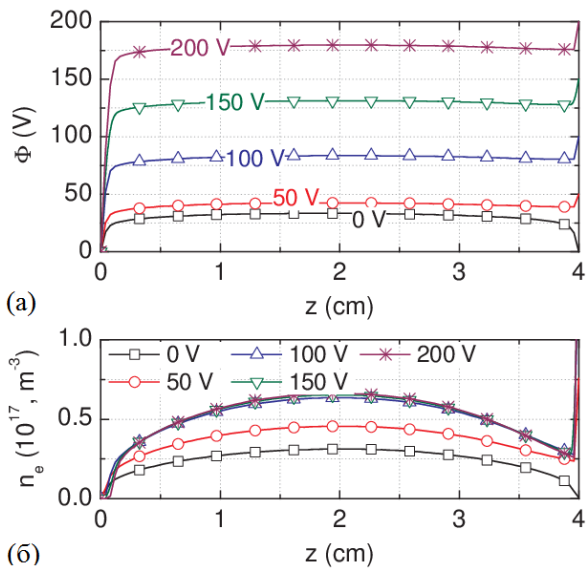
Фиг. 27. Пространственото разпределение на електронната концентрация (а) и температура (б), както и на плазмения потенциал (в) при $U_{PE} = 0 \text{ V}$.



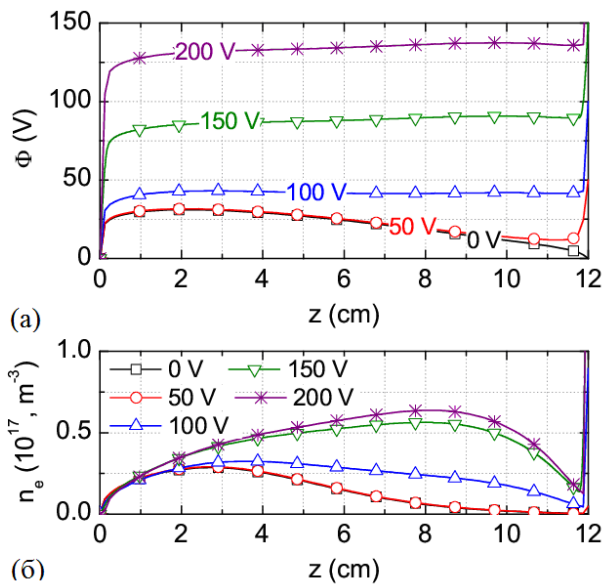
Фиг. 28. Същото като на Фиг. 27, но при $U_{PE} = 200 \text{ V}$ и $R_{PE} = 6 \text{ mm}$.

Прилагането на висок потенциал на РЕ ($U_{PE} = 200 \text{ V}$, Фиг. 28) води до драстични промени в пространственото разпределение на разряда: (а) максимумът на n_e е отместен към РЕ, (б) най-високата стойност на T_e е в областта на РЕ и (в) аксиалния спад на Φ , извън областта на внасяне на ВЧ мощност, е заменен от гладък аксиален профил.

Фигури 29 и 30 показват промените в аксиалния профили на плазмения потенциал с увеличаване на потенциала, приложен на ПЕ при разряд с малка дължина и разряд с голяма дължина. При ниски стойности на потенциала на ПЕ ($U_{PE} \leq 50 \text{ V}$) промените в плазмения потенциал са само пред ПЕ. Потенциал над 50 V води до първоначално цялостно нарастване на плазмения потенциал, последвано от изглаждане над 150 V . Резултат, напомним за аксиалния профил на плазмения потенциал на тлеещ разряд, който вече бе коментирал, като подходящ за извличане на отрицателните йони. За разлика от разряд с малка дължина (Фиг.29(б)), където позицията на максимума на електронната концентрация не се променя с потенциала на ПЕ, при разряд с голяма дължина (Фиг.30(б)) максимумът на концентрацията се премества към ПЕ. Това различие може да се свърже с размера на областта на разширяваща се плазма (в тези два случая), който осигурява пространството за изменения в аксиалната структура на

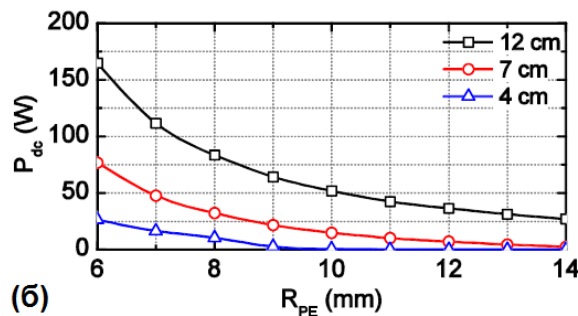
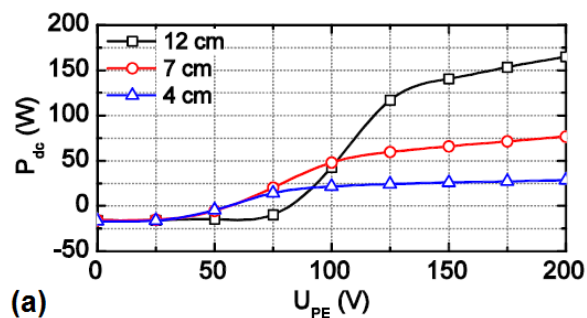


Фиг. 29. Аксиални профили (при $r = 0$) на плазменния потенциал Φ (а) и на електронната концентрация n_e (б) за разряд с дължина $L = 4$ cm и различни стойности на U_{PE} (дадени на фигурата); $R_{PE} = 6$ cm.



Фиг. 30. Същото като на Фиг. 29, но за $L = 12$ cm.

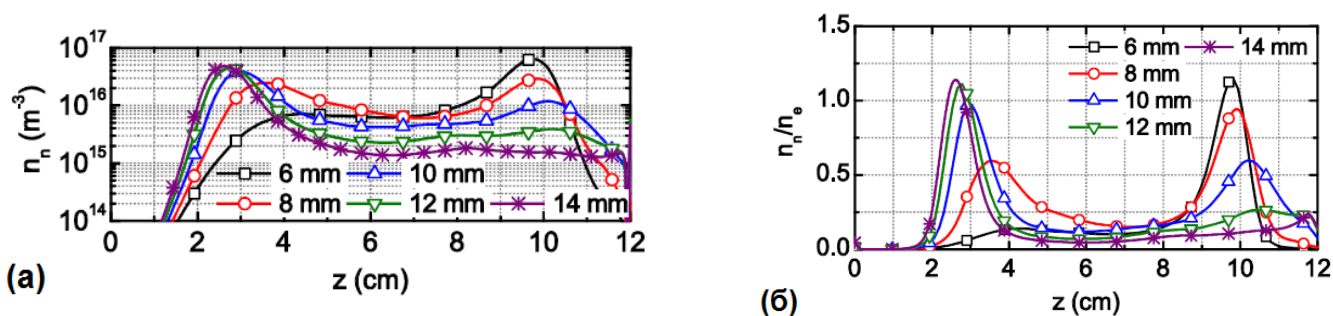
разряда. При разряд с малка дължина ($L < 2R$), областта на внасяне на ВЧ мощност заема повече от половината от дължината на разряда ($l_{rf} \approx L$), докато при разряд с голяма дължина ($L > 2R$ и област на внасяне ВЧ мощност с дължина $l_{rf} < L$), областта на разширяваща се плазма е достатъчно голяма.



Фиг. 31. Изменения в постоянно токова мощност при изменение на: (а) потенциала U_{PE} , приложен на РЕ при $R_{PE} = 6$ mm и (б) радиуса R_{PE} при $U_{PE} = 200$ V, при различни дължини на разряда – дадени на фигурата.

Сходството на индуктивен разряд с планарна намотка при висок положителен потенциал на РЕ с тлеещ разряд е резултат от **допълнителното внасяне на постоянно-токова мощност** (последният член (Q_{dc}) в (11)). **Формира се нов вид газоразрядна структура обединяваща ВЧ и постоянно-токов разряд.** Фигура 32 показва, че при разряд с голяма дължина ($L > 4$ cm) с РЕ с висок потенциал и малка площ (малък R_{PE} на Фиг. 31(б)) внесена постоянно-токова мощност P_{dc} (Q_{dc} интегрирано по обема на разряда) дори превишава ВЧ мощност (50 W в дадения

случай). Нарастването на електронната температура в областта пред плазмения електрод (Фиг. 28(б)) е резултат от внасянето на постоянно-токовата мощност и съответно от набирането на енергия на електроните в областта със силно електрично поле пред РЕ. Увеличената електронна концентрация (Фигури 28(в) и 30(б)) е също в резултат на допълнително внесена постоянно-токова мощност. По този начин **областта на плазмено разширение на индуктивния разряд се заменя от положителен стълб на тлеещ разряд. Съответно, областта на внасяне на ВЧ мощност на индуктивния разряд заменя катодния пад на тлеещия разряд.** Ролята на P_{dc} се променя с нарастване на приложения потенциал на плазмения електрод: докато при ниски стойности на U_{PE} , P_{dc} е загуба на енергия на електроните ($P_{dc} < 0$), то при по-високи стойности на U_{PE} P_{dc} се трансформира в приток на енергия ($P_{dc} > 0$). Бързият преход от загуба на енергията на електроните за поддържане на постоянно поле в разряда ($P_{dc} < 0$) към внасяне на постоянно-токова мощност в разряда ($P_{dc} > 0$) е последван от област на насищане при високи стойности на U_{PE} (Фиг. 31(а)). Насищането в $P_{dc}(U_{PE})$ води до насищане в нарастването на n_e (Фиг. 29(б) и 30(б)). С увеличаване на дължината на разряда P_{dc} влиза в насищане при по-високи стойности на U_{PE} , като стойностите на P_{dc} в областта на насищане нарастват. **Изводът, е че наличието на добре обособена област на разширяваща се плазма при разряд с голяма дължина осигурява достатъчно пространство за поддържането на постоянно-токов разряд.**

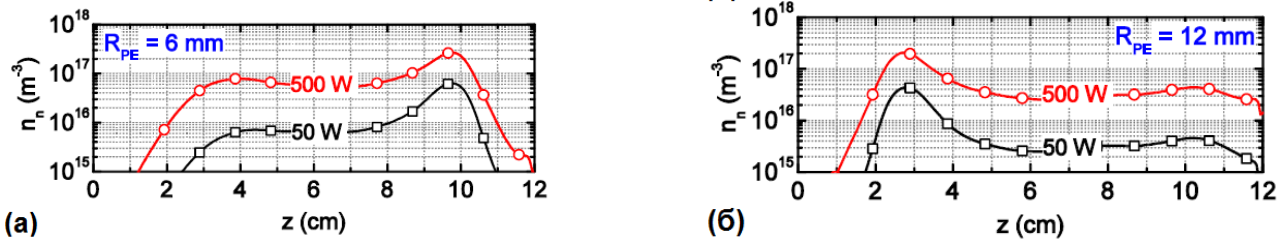


Фиг. 32. Аксиални профили на концентрацията на отрицателните йони n_n (а) и тяхното отношение към електронната концентрация (б) за различни стойности на R_{PE} на РЕ; $L_{PE} = 12$ cm и $U_{PE} = 200$ V.

Фигура 32(а) показва, че прилагането на висок потенциал на ПЕ води до **формирането на втори максимум на концентрацията на отрицателните водородни йони до ПЕ**, който нараства с намаляване на площта на ПЕ (т.е. с намаляване на R_{PE}). При това, концентрацията на отрицателни йони във втория максимум е приблизително равна на електронната (Фиг. 32(б)).

При абсорбирана ВЧ мощност $P_{rf} = 500$ W (която е напълно приемлива стойност за единичен разряд от матрицата) и плазмен електрод с малка площ ($R_{PE} = 6$ mm, Фиг.

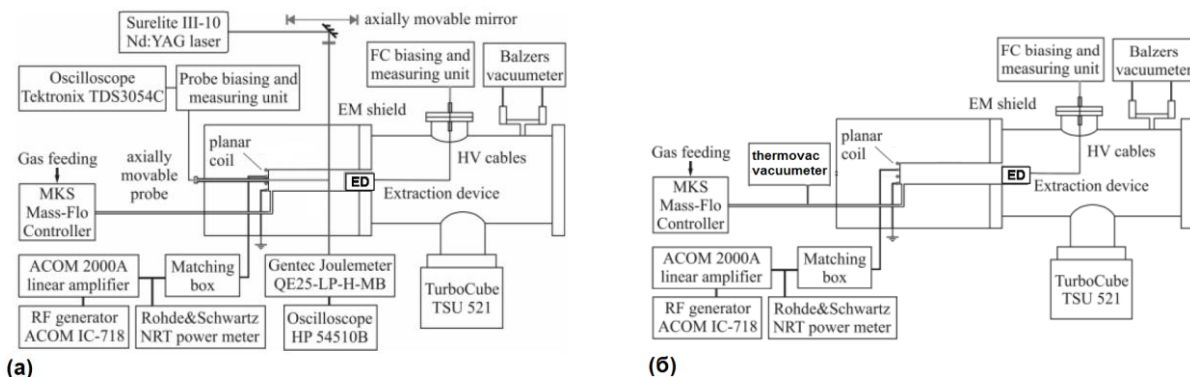
33(a)), концентрация на отрицателните йони в областта на извличане е $n_n = 10^{17} \text{ m}^{-3}$. При по-голяма площ на плазмения електрод ($R_{PE} = 12 \text{ mm}$, Фиг. 33(б)), концентрацията на отрицателните йони в областта на извличане е малко по-ниска ($n_n = 4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$).



Фиг. 33. Аксиални профили на концентрацията на отрицателните йони n_n получена за $R_{PE} = 6 \text{ mm}$ (а) и $R_{PE} = 12 \text{ mm}$ (б) за две стойности на приложената ВЧ мощност, дадени на фигурата; $L_{PE} = 12 \text{ cm}$ и $U_{PE} = 200 \text{ V}$.

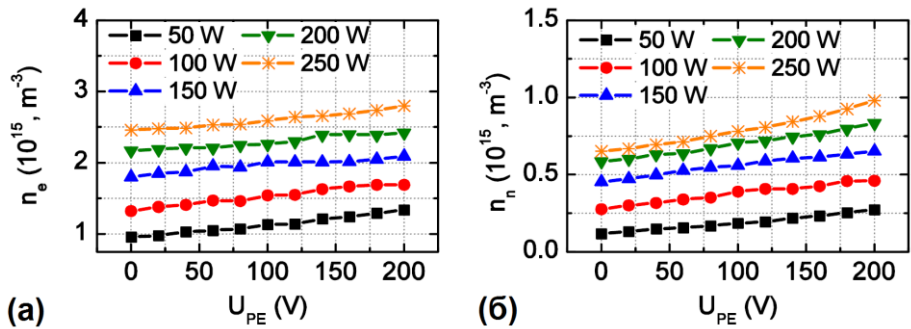
Основният извод е, че пространствената структура на плазмения потенциал, а от там и пространственото разпределение на концентрацията на отрицателните йони, в единичен елемент на матричния източник може да бъде ефективно контролирана чрез прилагането на висок потенциал на РЕ. **Показано е че в индуктивен разряд с плоска намотка се формира нов вид – хибридна – газоразрядна структура, обединяваща ВЧ и постояннотоков разряд.**

Последната част на Глава 5 представя резултати от **диагностика на плазмата в областта на извличане на йоните** (в условията на екстракция), както и резултати от **извличането на йоните в двата мода на разряда**. В изследванията по извличането на йоните придружени с диагностика се търси корелация между концентрациите на електроните и йоните вътре в разряда и извлечените токове. **Целта е да се очертаят насоки за изследванията в индуктивен мод.**



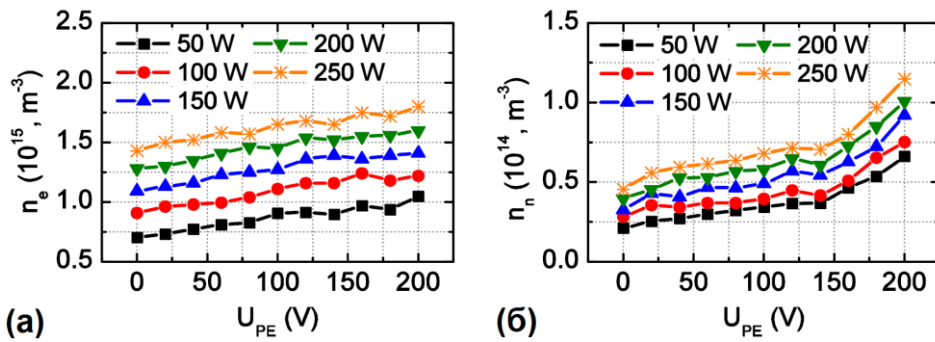
Фиг. 34. Схематично представяне на експерименталната установка: установка за сондова диагностика и за диагностика по метода на лазерното фотоотделяне на 1.5 cm от РЕ, както и за измерванията върху извличане на отрицателните йони при ниска приложена ВЧ мощност в кондензаторен мод (а) и установка за извличане на отрицателните йони при висока приложена ВЧ мощност в индуктивен мод (б).

На Фиг. 34 е представена експерименталната установка в двете ѝ модификации, комплектувани с оглед на сондова диагностика, диагностика по метода на лазерно фотоотделя в комбинация със сонда и измервания по екстракцията на йоните от разряд в capacitивен мод (Фиг. 34(а)) и екстракция на йоните от разряд в индуктивен мод (Фиг. 34(б)). И в двата случая разрядът е индуктивен (с планарна намотка с 3.5 навивки) в кварцова тръба с радиус 2.25 cm. Приложена ВЧ мощност $P_W = (50 - 250) \text{ W}$ поддържа разряд в capacitивен мод, а при $P_W = (500 - 880) \text{ W}$ – модът на разряда е индуктивен.



Фиг. 35. Изменение на електронната (а) и йонната (б) концентрации с увеличаването на потенциала U_{PE} , приложен на PE, при различни стойности на P_W , дадени на фигурата; дължина на разряда $L_d = 6 \text{ cm}$.

Измерванията по сондова диагностика и диагностика по метода на лазерното фотоотделяне са в областта на извличане – на 1.5 cm от PE. Проведени са при две дължини на разряда (12 cm и 6 cm) и различен потенциал на ПР $U_{PE} = (0-200) \text{ V}$.

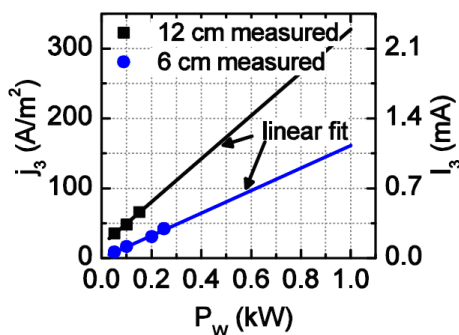


Фиг. 36. Същото като на Фиг. 35, но за разряд с дължина $L_d = 12 \text{ cm}$.

Резултатите показват (Фиг. 35 и 36), че електронната концентрация и концентрацията на отрицателните йони нарастват с увеличаване на потенциала на ПЕ и с увеличаване на приложената ВЧ мощност. Нарастването на n_e и n_n с U_{PE} в разряд с дължина $L_d = 6 \text{ cm}$ е почти линейно за всички стойности на приложената ВЧ мощност, с изключение на най-високата ($P_W = 250 \text{ W}$). Това, както и различния наклон на нарастването $n_n(U_{PE})$ и $n_e(U_{PE})$ могат да се свържат с различния начин на формиране на пространственото разпределение на n_n и n_e . Отклонението от линейното нарастване на $n_n(U_{PE})$ при $P_W = 250 \text{ W}$ в разряд с малка дължина (Фиг. 35(б)) става значително по-добре изразено (за всички стойности на P_W) при разряд с дължина $L_d = 12 \text{ cm}$ (Фиг. 36

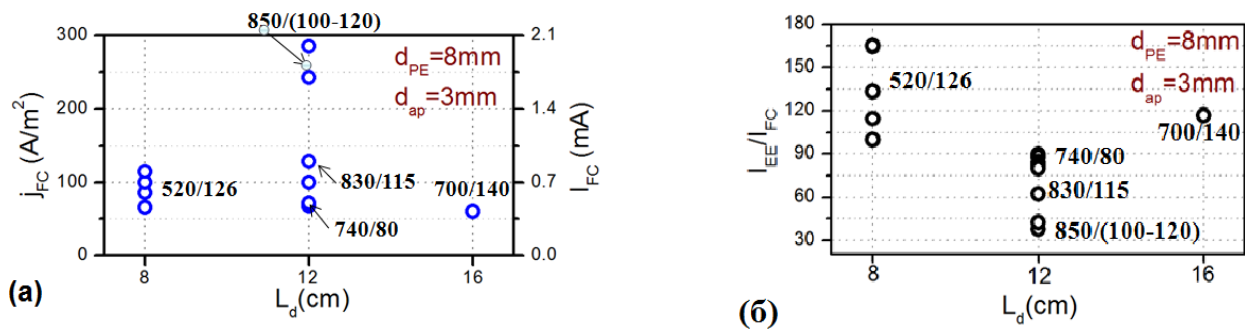
(б). Тъй като зависимостта на n_e от U_{PE} в разряд с голяма дължина (Фиг. 36(а)) е подобна на тази в разряд с малка дължина (Фиг. 35(а)), по-силното нарастване на n_n при по-високи стойности на U_{PE} (Фиг. 36(б)) може да се свърже с по-силно акумулиране на отрицателни йони, при по-висок потенциал на PE.

Експериментите по извличане на отрицателни водородни йони са проведени при условията, при които са измерванията по сондовата диагностика и диагностиката по метода на лазерното фотоотделяне. Получените резултатите (Фиг. 37) показват линейно нарастване на тока на извлечените отрицателни йони с увеличаване на приложената ВЧ мощност, което е в съответствие с нарастването на n_n пред PE с приложената ВЧ мощност (Фиг. 35(б) и 36(б)). За да се добие представа за очакваните стойности при работа на разряда в индуктивен мод, линейната зависимост $j_3(P_W)$ е екстраполирана до $P_W = 1$ kW което е разумна стойност за единичен разряд на матричния източник. Разряд с дължина 12 cm при ВЧ мощност $P_W > 600$ W, което съответства на индуктивен мод, би осигурил плътност на извлечения ток от отрицателни водородни йони над 200 A/m².



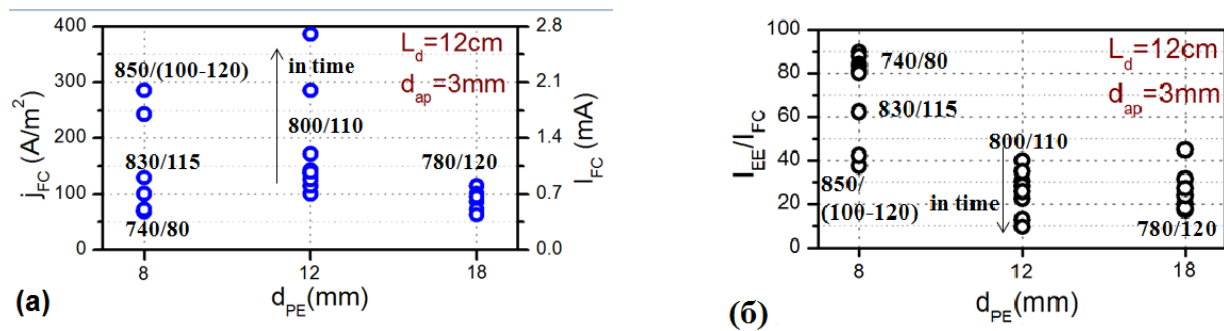
Фиг. 37. Зависимост на тока и на плътността на тока на извлечените йони от приложената ВЧ мощност; измервания разряд с дължина $L = 6$ cm и $L = 12$ cm (със символи) при $U_{PE} = 200$ V и тяхната линейна екстраполация (с плътна линия).

Експерименталната установка за **извличане на йоните при висока приложена ВЧ мощност** $P_W = (500-880)$ W, **поддържаща индуктивен мод**, схематично е представена на Фиг. 34(б). С оглед на екстракцията при тези условия са направени следните промени спрямо извличането в капацитивен мод: (а) в разряда няма сонда (б) потенциалите на втория и третия електрод са намалени, (в) вторият електрод EE/ESE на извличащата система е изместен към FC (с цел намаляване пробивите между EE/ESE и PE), и (г) EE/ESE е снабден с охлаждащо устройство. За стабилното поддържане на индуктивния мод газовият поток е увеличен, като налягането в камерата зад извличащото устройство е $p = 1.5$ mTorr. Потенциалът на PE се поддържа при една и съща стойност $U_{PE} = 200$ V. Дължината на разряда и площта на PE са изменяни: измерванията са в разряди с $L_d = (8, 12, 16)$ cm при диаметър на плазмения електрод $d_{PE} = (8, 12, 16)$ mm (апертурата на PE е $d_{PE} = 3$ mm).



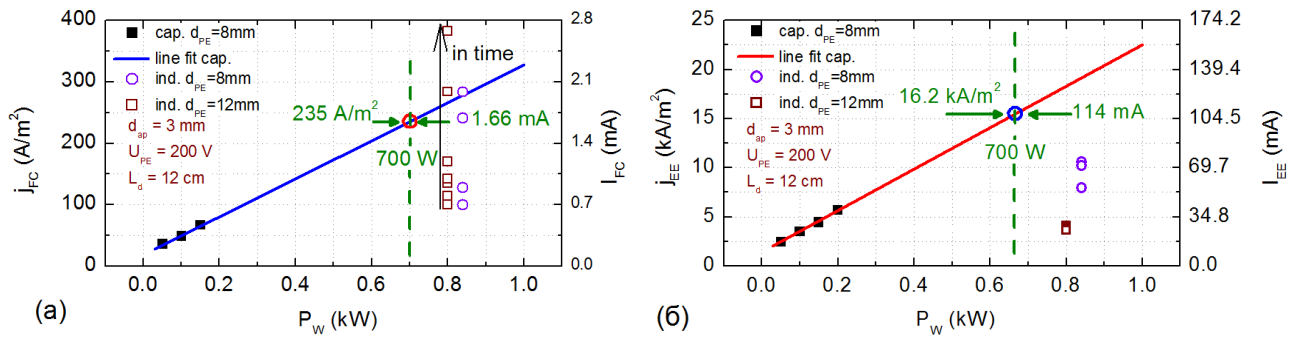
Фиг. 38. (а) Ток I_{FC} и плътност на тока j_{FC} на извлечените отрицателни йони и (б) отношение на извлечения електронен към йонния ток I_{EE}/I_{FC} , при различни дължини на разряда и зададена площ и апертура на РЕ (посочени на фигурите). Потенциали на електродите на извличащото устройство: $U_{PE} = 200$ V, $U_{EE} = 600$ V, $U_{FC} = 1.5$ kV. Числата, дадени на фигурите показват отношението $P_W[W]/P_{dc}[W]$ на внесените ВЧ и постояннотокова мощности.

Резултатите при различни дължини на разряда и фиксиран диаметър на РЕ $d_{PE} = 8$ mm, (Фиг. 38) показват, че най-високата измерена стойност на плътността на извлечения ток от отрицателните йони – почти 300 A/m² (Фиг. 38(а)) – е от разряд с дължина 12 cm. Съответно, това е случая с най-ниска стойност на отношението на електронния към йонния ток I_{EE}/I_{FC} (Фиг. 38 (в)).



Фиг. 39. Същото като на Фиг. 38, но за различни стойности на площта на РЕ и зададена дължина на разряда и апертура на РЕ (дадени на фигурата); със стрелки е означена посоката на промяната в стойностите с времето.

Изменението на j_{FC} , j_{EE} и I_{EE}/I_{FC} с увеличаване на площта на РЕ при фиксирана – вече като оптимална – стойност на дължината на разряда $L_d = 12$ cm е представено на Фиг. 39. Най-високата постигната стойност на плътността на извлечения ток – почти 400 A/m² – е постигната при продължителна работа на разряда (в случая – 10 минути) в случая на РЕ с диаметър $d_{PE} = 12$ mm. Тъй като токът на втория електрод I_{EE} остава почти постоянен във времето, то отношението I_{EE}/I_{FC} намалява с времето. **Изводът е**, че дължина $L_d = 12$ cm на разряда и диаметър на РЕ $d_{PE} = 12$ mm са подходяща комбинация за извличане на отрицателните йони.



Фиг. 40. Сравнение на резултатите за тока I_{FC} и плътността на тока j_{FC} на йоните (а) и на електроните I_{EE} и j_{EE} (б), получени в индуктивен мод с линейната екстраполация на резултатите в капацитивен мод (Фиг. 5.22(б)). С пълтни черни символи са означени резултатите в капацитивен мод, получени при $d_{PE} = 8$ mm, с пълтна линия – линейната екстраполация на резултатите в капацитивен мод, а празните символи са резултатите в индуктивен мод, при $d_{PE} = 12$ mm и $d_{PE} = 8$ mm; $L_d = 12$ cm, $U_{PE} = 200$ V и $d_{AP} = 3$ mm.

Фиг. 40(а) показва, че линейната екстраполация тока и плътността на тока на извлечените отрицателни йони в капацитивен мод минава през интервала от стойности на резултатите, получени в индуктивен мод. Получената най-висока стойност 400 A/m^2 на плътността на тока на извлечените йони, надвишава тази, предвидена от екстраполацията на резултатите в капацитивен мод на разряда. Това и би трябвало да се очаква, тъй като преходът от капацитивен в индуктивен мод е със скок в електронната концентрация [20] и линейната екстраполация с увеличаване на приложената ВЧ мощност в индуктивен мод би трябвало да започне от по-висока стойност на йонния ток поради по-високата начална концентрация на електроните (електронната концентрация е фактор, определящ локалното създаване на отрицателните йони). Измереният електронен ток, извлечен от разряд в индуктивен мод, е под очакваната линейна екстраполация на резултатите от капацитивен мод на работа на разряда (Фиг. 40(б)). Това трябва да се отчете като положителен резултат, поради желаната ниска стойност на отношението на плътностите на електронния и йонен ток при работата на източниците на отрицателни водородни йони.

Експериментите върху екстракцията от разряд в индуктивен мод, които са крайния етап на представените в Глава 5 изследвания, показват 400 A/m^2 като стойност на постигнатата плътност на извлечения йонен ток при приложена за поддържане на разряда ВЧ мощност 800 W , което надвишава известните от литературата [21,22] стойност за отношението на извлечен йонен ток към приложена ВЧ мощност. Постигната е при извличане на обемно създадени йони от разряд с дължина 12 cm чрез подаване на потенциал 200 V на плазмен електрод с диаметър 12 mm .

Приноси

1. Разработен е начин за контрол на вътрешен параметър на плазмата: контрол върху пространственото разпределение на потенциала на постоянното електрично поле в индуктивен разряд с плоска намотка чрез приложен отвън висок постоянен потенциал.

2. Формиран е на нов вид разряд, представляващ хибридна газоразрядна структура, обединяваща индуктивен разряд с плоска намотка с постоянно-токов разряд, с което се постига аксиален профил на плазмения потенциал в индуктивен разряд, наподобяващ този на постоянно-токов тлеещ разряд: по отношение на постоянно-токовия разряд прикатодния му пад е заменен с област на внасяне на ВЧ мощност на индуктивен разряд, а по отношение на индуктивния разряд - областта му на плазмено разширение (със спад на потенциала в нея) е заменена с положителен стълб на тлеещ разряд.

3. Чрез комбиниране на експерименти по сондова диагностика и диагностика по метода на емисионната оптична спектроскопия с фазово разделяне са идентифицирани двата мода на индуктивен разряд с плоска намотка – индуктивен и капацитивен мод. За разлика от твърденията в литературата, е установено, че механизмът на поддържане на капацитивния мод е напълно аналогичен на този на капацитивен разряд.

4. Експериментално са потвърдени теоретичните основи на концепцията за матричен източник на обемно създавани отрицателни йони.

5. Експериментално е показано, че локализираното външно магнитно поле е фактор, определящ мода на индуктивен разряд с плоска намотка: магнитно поле, поставено в близост до областта на внасяне на високочестотната мощност, трансформира разряд в капацитивен мод в разряд в индуктивен мод.

6. В противовес на общоприетото твърдение, че смущението в плазмените параметри, дължащо се на внасяне на сонда в разряда, е ограничено в слоя от некомпенсиран заряд, формиращ се около сондата, е показано, че сондата влияе върху цялостната структура на разряда. Изменението в стойностите на плазмените параметри при позицията на сондата не надвишава 10%, което трябва да се добави като грешка при определяне на точността на сондовите измервания.

Списък на публикациите по дисертацията

А. Публикации в международни научни списания:

A1. St. Lishev, A. Shivarova, Kh. Tarnev, S. Iordanova, I. Koleva, Ts. Paunska and D. Iordanov

“On the Two Modes of Operation of Planar-Coil-Driven Inductive Discharges in Hydrogen”

J. Phys. D: Appl. Phys **46** (2013) 165204 (10pp).

Импакт фактор: 2.521

A2. D. Yordanov, St. Lishev and A. Shivarova

"How Does a Probe Inserted into the Discharge Influence Its Structure?"

J. Appl. Phys. **119** (2016) 183302 (10pp).

Импакт фактор за 2015:2.181

Б. Доклади от международни научни конференции, публикувани в научни списания с импакт-фактор

B1. St. Lishev, D. Yordanov and A. Shivarova

"Diagnostics in a Single Element of a Matrix Source of Negative Hydrogen Ions"

15th Int. Conf. on Ion Sources (ICIS – 2013, September 9th-13th, 2013, Chiba, Japan)

in: *Rev. Sci. Instrum.* **85** (2014) 02B101 (3pp).

Импакт фактор: 1.614

B2. D. Yordanov, St. Lishev and A. Shivarova

"Single Element of the Matrix Source of Negative Hydrogen Ions: Measurements of the Extracted Currents Combined with Diagnostics"

16th International Conference on Ion Sources (ICIS – 2015, August 23rd-28th, 2015, New York, USA)

in: *Rev. Sci. Instrum.* **87** (2016) 02B116 (3pp).

Импакт фактор за 2015: 1.614

- Б3. St. Lishev, A. Shivarova, and D. Yordanov
"Motivation of Concepts for the Negative Ion Extraction From a Single Element of the Matrix Source"
16th Int. Conf. on Ion Sources (ICIS – 2015, August 23rd-28th, 2015, New York, USA)
in: *Rev. Sci. Instrum.* 87 (2016) 02B115 (5pp).
Импакт фактор за 2015: 1.614

В. Доклади от международни научни конференции, публикувани в поредици

- В1. St. Lishev, D. Yordanov and A. Shivarova
"Tests on the Extracted Current Density of Negative Hydrogen Ions from a Single Element of the Matrix Source"
4th Int. Symp. on Negative Ions, Beams and Sources (NIBS - 2014, October 2014, Garching, Germany, 2014)
in: *AIP Conf. Proc.* 1655 (2015) 040013 (8pp).

Г. Доклади на научни конференции, публикувани в материалите на конференциите

- Г1. St. Lishev, D. Iordanov, Kh. Tarnev and A. Shivarova
"Probe Diagnostics in a Single Element of a Matrix Source of Negative Hydrogn Ions"
Proc. 31st Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG – 2013, July 14th-19th, 2013, Granada, Spain), Topic number: 8.
- Г2. St. Lishev, D. Yordanov and A. Shivarova
"Extraction of Negative Hydrogen Ions from a Single Discharge of a Matrix Source"
Proc. XXII Europysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG-2014, July 15th-19th, 2014, Greifswald, Germany), Topic number: 9.

- Г3. D. Yordanov and St. Lishev
"On the influence of a single probe on the spatial distribution of the plasma parameters in a small-radius inductively-driven discharge in hydrogen"
Proc. XXXII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG – 2015, July 26th-31st, 2015, Iași, Romania), Topic number: 5.
- Г4. Ст. Лишев, Д. Йорданов, Хр. Търнев и А. Шиварова
"Индуктивен разряд с плоска намотка и плазмено разширение при магнитен филтър"
Втори национален конгрес по Физически науки (септември 2013, София, България).

Участия в научни конференции:

1. 2nd National Congress on Physics Sciences (September 25-29, 2013, Sofia, Bulgaria)
2. XXII Europysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG-2014, Greifswald, Germany, July 15th-19th, 2014)
3. 4th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources (NIBS 2014, Garching, Germany, October 6th-10th, 2014)
4. XXXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG – 2015, July 26th-31st, 2015 Iasi, Romania)
5. 16th International Conference on Ion Sources (ICIS – 2015, August 23rd-28th, 2015 New York, USA)

Общ импакт фактор на публикуваните работи: 9.544

Цитирания на публикациите: 5

Публикация №1 е цитирана 1 пъти

¹Th. Wegner, C. Kuellig, J. Meichsner, *Plasma Sources Science & Technology*, **24** (2015), 044001.

Публикация №3 е цитирана 4 пъти

¹S. Iordanova, Ts. Paunсka, A. Pashov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2015), 485204.

²M. Bacal, M. Wada, *Appl. Phys. Rev.* **2** (2015) 021305

³S Mochalskyu, D Wunderlich, B Ruf, U Fantz, P Franzen, T Minea, *Plasma. Phys. and Contr. Fus.*, **56** (2014),105001.

⁴S. Iordanova, A. Pashov, *AIP Conf. Proc.*, **1655** (2015), 040012.

Забележка: В публикациите А1 и Г1 фамиленото ми име е изписано като "Iordanov", а в останалите публикации е "Yordanov".

Литература

- [1] St. Lishev, Ts. Paunсka, A. Shivarova and Kh. Tarnev, *Rev. Sci. Instrum.* **83** (2012) 02A702.
- [2] Ts. Paunсka, A. Shivarova and Kh. Tarnev, Proc. 30th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (Belfast, 28 August - 2 September 2011), topic no C9 (024).
- [3] Ts. Paunсka, A. Shivarova and Kh. Tarnev, 21st ESCAMPIG (Viano do Castelo, July 10-14, 2012), topic no 9.
- [4] St. Lishev, A. Shivarova and Ts. Tsankov, *J. Phys: Conf. Series* **223** (2010) 012001.
- [5] Ф. Ф. Чен, *Електрически зонды, в: Диагностика пламы*, ред. Р. Хаддлстоун и С. Леонард (Мир, Москва, 1967).
- [6] J. E. Allen, R. L. F. Boyd and P. Reynolds, *Proc. Phys. Soc.* **70** (1957) 297.
- [7] M. Bacal, *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 3981.
- [8] J. Schulze, E. Schüingel, Z. Donkó, D. Luggenhölscher and U. Czarnetzki, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 124016.
- [9] A. Piel, *An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010).
- [10] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Material Processing* (Wiley, New York, 1994).

- [11] M. Bacal, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Research* **B37/38** (1989) 28.
- [12] A. Demerdziev, Kh. Tarnev, St. Lishev and A. Shivarova, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2015) 045204.
- [13] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, Москва, 1987).
- [14] В. Е. Голант, А. П. Жилинский и И. Е. Сахаров, *Основы физики плазмы* (Атомиздат, Москва, 1977).
- [15] St. Lishev, A. Shivarova and Kh. Tarnev, *J. Plasma Phys.* **77** (2011) 469.
- [16] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, *Phys. Rev. E* **51** (1995) 1376.
- [17] G. J. M. Hagelaar, F. J. de Hoog and G. M. W. Kroesen, *Phys. Rev. E* **61** (2000) 1452.
- [18] Ts. Paunska, A. Shivarova, Kh. Tarnev and Ts. Tsankov, *Phys. Plasmas* **18** (2011) 023503.
- [19] Ts. Paunska, A. Shivarova, Kh. Tarnev and Ts. Tsankov, *AIP Conf. Proc.* **1097** (2009) 12.
- [20] M. M. Turner and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) 313.
- [21] K. N. Leung, G. J. DeVries, W. F. DiVergilio, R. W. Hamm, C. A. Hauck, W. B. Kunkel, D. S. McDonald and M. B. Williams, *Rev. Sci. Instrum.* **62** (1991) 100.
- [22] V. D. P. Moehs, J. Peters and J. Sherman, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **33** (2005) 1786.

Благодарности

Бих искал да изкажа големи благодарности на научният си ръководител проф. д-р Антония Шиварова, както и на научния си консултант доц. д-р Стилиян Лишев за неограничената помощ при работата върху дисертацията през годините.

Благодаря и на колегите от Групата по Физика на плазмата и газовия разряд за ползотворните дискусии, полезните съвети и благоприятната обстановка за работа.

Специални благодарности към семейството и приятелите ми за подкрепата.

Изследванията, включени в дисертацията, са в рамките на работата на Групата по Физика на плазмата и газовия разряд при Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ по програми EURATOM и EUROfusion на Европейската комисия. Изследванията (2013 год.), финансирани по програма EURATOM на 7-ма рамкова програма са по задача 2.1.1 от плана на българската Асоциация ЕВРАТОМ-ИЯИЯЕс финансиране от Националния Фонд Научни изследвания (ФНИ – МОН), и участие в проект по допълнително нагряване на термоядрена плазма чрез снопове от неутрални частици (Heating and Current Drive – Neutral Beams (HCD-NB)) по програма EFDA-PPPT (European Fusion Development Agreement – Power Plant Physics and Technology).

Изследванията (2014 год. – 2016 год.) по програма EUROfusion на Хоризонт 2020 са част от участието на колектива в проекта за Допълнително нагряване на термоядрена плазма (Heating and Current Drive Project – HCD) и в проекта образование (Education).

Acknowledgments

Part of the work has been supported by the European Atomic Energy Agency (EURATOM) through the Association EURATOM/INRNE (task 2.1.1) and it is also within EFDA PPPT-2014 work plan (HCD: NB).

The rest has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the EURATOM research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.