

**Авторска справка за приносния характер на трудовете на
гл. ас. д-р Цветелина Венелинова Паунска, представени за участие в
конкурс за доцент по
направление 4.1. Физически науки /радиофизика и физическа
електроника/
към Физически факултет на СУ „Св. Климент Охридски“**

В конкурса за доцент (обявен в Държавен вестник, брой 103, от 27 декември 2016 г.) участвам общо с 28 научни публикации. В авторската справка, публикациите са цитирани съгласно номерацията, в документа “Б Списък на публикациите, представени за участие в конкурса“.

Научната ми работа е в областта на физиката на плазмата и газовите разряди. Тя е насочена основно в две направления: вълноводни разряди (разряди в поле на повърхнинна вълна) и източници на отрицателни водородни йони с оглед на приложението им в системите за допълнително нагриване на плазмата в установките за термоядрен синтез от типа на ITER и DEMO. Почти всичките ми изследвания са по тематика и проекти на групата по Физика на плазмата и газовия разряд при Физическия факултет, на която съм член от студентските си години. Повечето ми публикации са теоретични в областта на численото моделиране. Моделите се основават на флуидната теория за описание на плазмата и са направени на софтуерните платформи за развойна дейност: Mathematica и Comsol Multiphysics. В експерименталната работа съм участвала в спектрална диагностика на плазма на водородни разряди с оглед на приложенията им, като източници на отрицателни водородни йони.

1. Разряди на повърхнинна вълна: числено моделиране

Разрядите, създавани от разпространяваща се повърхнинна вълна (ПВ) са известни още, като вълноводни разряди, тъй като в тези разряди електромагнитната вълна създава плазмата, а създадената плазма (заедно с газоразрядната тръба и свободното пространство) образуват вълноводната структура, която поддържа разпространението на вълната. Вълноводните разряди са интересни с това, че те демонстрират в „чист“ вид дефиницията на газовите разряди, като нелинейна самосъгласувана система „плазма“ и „поле“. Установяването на механизмът на самосъгласуваност, т.е. връзката между плътността на плазмата и поддържащото разряда поле (изразена, чрез мощността, която се пада осреднено на един електрон) е получено за разряди в различни газове. Тази връзка е ключова за разбирането на това, как се формира структурата на разряда и би била индиректно полезна в различните приложения на разрядите на ПВ.

В [1-3] на базата на разработен флуиден модел в дифузионен режим е установен механизмът на самосъгласуваност на водородните разряди – качествено нов в сравнение с разряди в атомни газове. Основава се на ролята на водородните атоми за формирането на

връзката между мощността, която осреднено се пада на един електрон и плазмената плътност.

Добре известен факт, е че плътността на плазмата в разрядите на ПВ е аксиално нехомогенна. Освен това при едни и същи газоразрядни условия с повишаване на приложената мощност нараства дължината на плазменния стълб, като това не води до промени в аксиалния градиент на плазмената плътност. Тези зависимости са наблюдавани експериментално в разряди в атомни (Ar, He, Ar-He) и молекулни (O₂, N₂) газове. Различна е картината в разряди на ПВ във водород: аксиалният градиент на плазмената плътност зависи от приложената мощност, като той намалява с повишаване на мощността. Това поведение е получено и обяснено в [1]. В модела температурата на стените е външен параметър и е свързана с приложената мощност: с нарастване на приложената мощност, температурата на стените нараства. Специфичното за водородните разряди е високата степен на дисоциация и формирането на атомни и два вида молекулни йони. Атомните йони са основен вид йони, а те се създават чрез йонизация на водородни атоми. С нарастване на температурата на стените, загубите на водородни атоми нараства, което води до намаляване на атомните йони, а това означава, че основните плазмени параметри се балансират при по-ниска плазмена плътност, ето защо началото на разряда започва при по-ниска електронна концентрация и от там е с по-малък градиент.

Изменението на аксиалната структура на разряд при различни стойности на налягането на газа, на честотата на вълната (диапазон покриващ микровълнов и радиочестотен разряд) [2] и на радиуса на газоразрядната тръба [3] са изследвани и анализирани.

По отношение на диапазона от налягания, моделите на разряди на ПВ в литературата покриват преди всичко областта на дифузионен режим и режима при атмосферно налягане. Работа [4] е радиален флуиден модел на този вид разряди в аргон при ниско налягане покриващ освен дифузионният режим и режимът на свободен пробег. Моделът е самосъгласуван обединяващ плазма и вълново поле. Резултатите за радиалната структура получени, чрез замяна на условието за квазинеутралност с уравнението на Поасон плавно покриват сърцевината на плазменния стълб и слоя при стените. Наред със значението на насоченото движение в радиалното постоянно поле, което е особеност на режима на свободен пробег, моделът показва съществената роля на нелокалното нагряване на електроните, ефект на резонансната абсорбция на вълновото поле в слоя при стените.

2. Високочестотни разряди във водород при ниско налягане с оглед на приложенията им в източниците на отрицателни водородни йони

Водородните разряди при ниско налягане намират приложение в две направления: в плазмените технологии (в микроелектрониката, за израстване на диамантни покрития и др.) и в източниците за положителни и отрицателни водородни йони, които са част от установките за допълнително нагряване на термоядрена плазма със снопове от високоенергитични водородни атоми. Работи [5-7, 9-11, 13-17, 20, 27] са мотивирани от второто приложение по специално от източниците на отрицателни водородни йони. Тези

източници са предпочитани, тъй като отрицателните водородни йони се неутрализират с висока ефективност. Те се образуват, чрез реакции в обема на плазмата (дисоциативно прилепване на електрон към вибрационно възбудена молекула) и чрез процеси на стените използвайки цезии (Cs) материал с ниска отделителна работа. В началото източниците на отрицателните водородни йони са оптимизирани за обемно създаване на йоните, като конструкцията им от две камери осигурява област от високи температури (драйвер) оптимална за производство на вибрационно възбудени молекули и област с ниски температури (област на плазмено разширение) оптимална за дисоциативното прилепване на електрон към вибрационно възбудена молекула. С оглед на достигането на изискванията за екстрахираните токове за ITER, двукамерните източници са трансформирани в източници с повърхнинно създаване на йоните, чрез добавяне на Cs. Въпреки това, техническите предимства на източник базиран на обемните процеси, е причината такъв да бъде планиран за проекта DEMO.

В публикации [5,6] едномерният флуиден модел на водороден разряд съчетава особеностите на ниското налягане (режим на свободен пробег) и сложната кинетика на водородната плазма (частиците в модела са електрони, три вида положителни йони, отрицателни йони, водородни атоми, водородни молекули и вибрационно възбудени водородни молекули на основното електронно ниво ($v = 14$)). Изискването за ниско налягане е наложено от работното налягане на плазмата в Токамака, което е 0,3 Pa (2,25 mTorr). Отрицателните йони обикновено не се отчитат в повечето модели в литературата, тъй като водородната плазма е слабоелектроотрицателна. Резултатите в [6], показват, че отрицателните йони играят съществена роля във формирането на структурата на разряда. В резултат на обемните процеси, те се образуват по цялото радиално сечение на разряда, но вследствие на потока им в радиалното постоянно поле се натрупват в центъра на газоразрядната тръба. Варирането на налягането в тесен интервал, показва нарастване на концентрацията на отрицателните водородни йони с нарастване на налягането. С нарастване на мощността (електронната концентрация) концентрацията на отрицателните йони остава почти непроменена, това се дължи на компенсиращият ефект на намаляване на концентрацията на водородните молекули.

Публикации [7,9] са разширяване на модел [6], основният резултат е, че с намаляване на радиуса на газоразрядната тръба концентрацията на отрицателните йони в центъра на разряда расте. Това се дължи на увеличаване на потока на отрицателни йони в постоянното поле съчетано с намаляване на вероятността за загуби (дължината на радиуса на тръбата е от порядъка на времето на живот на йоните). При радиус 3 cm и относително ниска електронна плътност ($1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) е получен резултат за отношение на концентрациите на отрицателните йони и електроните в центъра на газоразрядната тръба от порядъка на 1. Това дава основание да смятаме, че единичен разряд с малък радиус може да се разглежда като подходящ източник на обемно създавани отрицателни водородни йони. Резултатите от публикация [9] са началото на формирането на концепцията за матричен източник на отрицателни водородни йони.

Двумерният (2D) модел на индуктивен разряд с цилиндрична намотка с малък радиус във водород [10,11,13] потвърждава и допълва резултатите от [9]: високата концентрация на отрицателни водородни йони в центъра на разряд с малък радиус се дължи преди всичко на потока на йоните от целия обем на източника. Акумулирането на

йоните е ефект на нелокалното поведение на разряда. Докато модели [10] и [13] са на разряд в дифузионен режим, [11] е 2D модел в режим на свободен пробег. В тази работа са достигнати налягания близки до изискванията за източниците на отрицателни йони, за целта в уравненията за движение на положителните йони е отчетен инерционният член, който действа, като задържаща сила, чрез числена процедура разработена в Групата по Физика на плазмата (St. Lishev and all., *J. Plasma Phys.* (2011), **77**, 469.). Потвърдено е, че разряд с малък радиус при ниско налягане е надежден източник на обемно създавани отрицателни водородни йони.

На базата на теоретични и експериментални изследвания в [15] е разработена концепцията за матричен източник на обемно създавани отрицателни водородни йони с екстракция на йоните от всеки разряд по отделно. Разрядите са индуктивни с малък радиус (~2-3 cm) и с плоска намотка. Плоската намотка е избрана, като конструктивно по-подходяща от цилиндричната. Ето защо моделите на единичният елемент на матричния източник са на индуктивен разряд с плоска намотка [14, 16, 17, 20, 27]. Разрядите с плоска намотка са разряди с поддържане на плазма в област отдалечена от мястото на внасяне на високочестотната мощност. Резултатите от модела в публикация [14] показват поддържане на разряда, в отдалечените области, вследствие на потоците на заредените частици. Отрицателните йони се натрупват в областта на максимума на потенциала на постоянното поле, намиращ се в близост до намотката. Влиянието на начина на внасяне на високочестотната мощност е изследван в [16, 17, 20], чрез самосъгласуван модел на единичния разряд на матричен източник. За целта към системата уравнения от предходните модели е добавено уравнението за векторния потенциал на високочестотното магнитно поле [16]. Плазмата се създава от ТЕ-мод. Сравнението в [20], на три начина за моделиране на високочестотната мощност (при еднаква внесена мощност), чрез симулиране на тока през плоската намотка, чрез задаване на индуцирания повърхнинен ток на стената с намотката, като гранично условие и чрез разпределение на внесената мощност със Супер Гаусов импулс, показва, че това не влияе върху разпределението на плазмените параметри и върху ефекта на събиране на отрицателните йони. Освен това, скин слоя на ТЕ-мода, който създава разряда се определя от геометричните размери (радиуса на тръбата), а не от плазмените параметри [17, 20]. Доказано е, че опростеният начин за внасяне на ВЧ мощност е достатъчно добро приближение.

В [27], моделът на единичен разряд на матричен източник е разширен, чрез замяна на режима при постоянно налягане, разгледан досега, с режим на проток на газа, каквато е и реалната ситуация. Във връзка с това са отчетени динамиката на неутралите (поотделно за атоми и молекули) и процесите на стените. Това добавя уравнения за баланса на водородните молекули, за баланса на енергията на водородните молекули и атоми. Изводът от резултатите е, че промяна в поведението на основните плазмени параметри (електронна концентрация, температура и потенциал на постоянното поле) не се променя, а те са в основата на концепцията за матричния източник. Освен това сравнението на разряди в проток и при постоянно налягане (решава се уравнението за състоянието на идеален газ с осреднена газова температура) показва, че при една и съща стойност на коефициента на рекомбинация на атомите на стените, разпределението на основните плазмени параметри остава непроменено, а концентрацията на водородните атоми зависи от локалните процеси. Анализирани са влиянието на коефициента на рекомбинация на атомите на стените като фактор, определящ

разпределението на неутралите в обема на разряда, който е от съществено значение за създаването на отрицателните йони.

3. Многокамерени плазмени източници на отрицателни водородни йони, основаващи се на индуктивни разряди

Решението за източника на отрицателни водородни йони за ITER е многокамерен източник (8 камери) с повърхнинно създаване на йоните (чрез Cs отложен на първият електрод на екстрахиращата система), това е източника SPIDER (Source for the Production of Ions of Deuterium Extracted from Radio frequency plasma), разработван в Consorzio RFX Падуа. Прототип на този източник е конструираният в института Макс Планк в Гархинг, Германия източник BATMAN (BAvarian Test MACHine on Negative ions). Конструкцията му е на двукамерен източник базиран на индуктивен разряд с цилиндрична намотка. Източникът е с локализирано внасяне на високочестотната мощност в първата камера и област на плазмено разширение във втората камера, където е разположен магнитният филтър за охлаждане на електроните. Това го определя, като разряд с нелокално поведение, за който потоците на заредените частици и на енергията на електроните играят съществена роля.

Публикации [19, 21-23, 26] са числени модели на източник с конфигурацията на SPIDER, а [24] с конфигурацията на BATMAN. Публикациите [19, 21] са начален етап от изграждането на флуиден модел на източника SPIDER при постоянно налягане 0,3 Pa и мощност 100 kW (съгласно изискванията за ITER). Поради големите размери на източника преодолените трудностите са свързани с големите размери на областта на моделиране. Получени са пространствените разпределения на електронната концентрация, положителните водородни йони, електронната температура, потенциала на постоянното поле и концентрацията на водородните атоми и молекули. Установено е, че поддържането на разряда във втората камера на източника се дължи на поток на енергията на електроните.

За източниците на отрицателни водородни йони ключова роля играят неутралите, ето защо моделът в [23] и [26] е разширение на [21] с отчитане на динамиката на неутралите, т.е. уравнението за идеалния газ е заменено с уравнения за баланса на водородните молекули и за баланса на енергията неутралите, отчетени са и процесите на стените. В резултат на това модела е на източник в режим на проток, подаваният поток на входа и изходният поток са съгласно конструктивните изисквания за SPIDER. Налягането, не е външен параметър, а е резултат от модела и има пространствено разпределение. Получени са резултати, както за пространственото разпределение на заредените частици и неутралите и температурите им, така и за потоците на частиците и потоците на енергията на електроните, водородните атоми и молекули. Съществен резултат е, че максимумите на концентрациите на заредените и неутрални частици, както и на техните потоци на енергията са във втората камера на източника, докато максимума на електронната температура е в първата камера, където се внася високочестотната мощност. Резултатите от модела показват наличие на вихров ток на електроните, с което е нарушено условието за амбиполярност характерно за разрядите при ниско налягане. Това явление е

наблюдавано и от други автори в литературата, но не е обяснена причината за възникването му.

В публикация [24] е изследван режимът на неамбиполяризираност. На базата на числен модел е показано, че: 1. При разряди с локализирано внасяне на високочестотната мощност, максимумите на електронната концентрация и електронната температура са отместени, електронната температура не е постоянна в резултат, на което градиентите на електронната концентрация и температура са непаралелни; 2. Полученото от равенството на потоците на електроните и йоните постоянно поле е неконсервативно; 3. За да се възстанови консервативността на постоянното поле, максимумите на потенциала и на електронната концентрация се отместват в резултат, на което възниква неконсервативно поле свързано с пълният поток, което възстановява консервативността на постоянното поле. Режимът на неамбиполяризираност се проявява не само в източниците на отрицателни йони, а във всички разряди, в които има локализирано внасяне на високочестотната мощност.

4. Определяне на плазмени параметри на източници на отрицателни водородни йони, чрез методите на оптичната емисионна спектроскопия

Оптичната актинометрия е метод за определяне на концентрацията на неутралната компонента на газоразрядна плазма. В [12] методът е приложен за определяне на концентрацията на водородните атоми в драйвера на двукамерен източник на отрицателни водородни йони. Като актинометър е използван аргон, представляващ 2,4 % от газовата смес. Резултати са получени от 4 актинометрични двойки ($H_{\alpha}:Ar_{811}$), ($H_{\beta}:Ar_{750}$), ($H_{\gamma}:Ar_{750}$) и ($H_{\alpha}:Ar_{750}$). От уравнението за баланса на възбудените атоми, чрез включване на дисоциативното възбуждане на водородните атоми е установено, че то е значимо само за двойките ($H_{\alpha}:Ar_{811}$) и ($H_{\gamma}:Ar_{750}$) при ниски налягания. Определена е степента на дисоциация в разряда в интервала налягания от 0.8 до 5.3 Pa тя се изменя от 3 до 20 %, като резултатът от отношенията на интензивностите $I(H_{\alpha})/I(Ar_{811})$ и $I(H_{\beta})/I(Ar_{750})$ е много близък. Газовата температура необходима за пресмятанията, е получена от разпределението на интензивностите на спектралните линии принадлежащи на молекулната ивица Fulcher- α .

Известно е, че за прилагането на методът на оптичната актинометрия е съществено да се определи, какъв процент от добавката, в случая Ar, няма да промени поведението на разряда. В [8] са направени измервания, които показват, че максимално допустимият процент от влаганата добавка е 4-5 %.

Работа [25] е изследване на неутралите в индуктивен разряд с плоска намотка на честота 27 MHz, чрез методът на емисионната спектроскопия при приложени мощности $P = (50-150)$ W и налягания $p = (90-160)$ mTorr. Определени са аксиалните профили на температурите на водородните атоми и молекули, както и отношението на концентрациите на два вида водородни атоми, едните в термично равновесие, а другите с висока енергия (около 8 eV). Приносът ми е участие в измерванията и обработката на

результатите за температурата на молекулите получена, чрез анализ на разпределението на интензивностите на молекулната ивица Fulcher- α и в създаването на модел на Comsol 3.5 за определяне на налягането в позицията на измерванията. Решавано е уравненото на Навие-Стокс. Индиректният начин за определяне на налягането се налага от сложната конфигурация на разряда, който е елемент от матричен източник на обемно създавани йони. Получен е, от драйвера на тандемен източник, чрез поставяне на екстрахиращо устройство на прехода между двете камери.

Публикация [28] е ударно радиационен модел на водороден разряд при ниско налягане, който позволява определяне на електронната концентрация и температура, чрез сравняване на експериментално получено отношение на интензивностите на линиите H_{α} и H_{β} със симулирано от модела. Съдействала съм за изграждането на модела, измерването на интензивностите и коментара на резултатите.

Дата: 31.01.2017 г.

Подпис:



/гл. ас. д-р Цв. Паунска/