

## РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за получаване на научната и образователна степен „доктор” в област на висше образование 4.1 – Физически науки (Физика на плазмата и газовия разряд)

Автор: Ангел Петров Демерджиев, редовен докторант във Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски”

Тема: ИНДУКТИВНИ РАЗРЯДИ ВЪВ ВОДОРОД ПРИ НИСКО НАЛЯГАНЕ

Рецензент: Боян Емилов Джаков, проф. дфн. ИЕ, БАН (пенсионер)

### 1. Общо описание на представените материали. Биографични данни

Със заповед No РД 038-714 от 22.11.2016 г. на Ректора на Софийския университет „Св. Климент Охридски” съм утвърден за член на научното жури за осигуряване на процедура за защита на дисертационния труд с автор: Ангел Петров Демерджиев. В съответствие с изискванията, освен документите с административен характер, докторантът е приложил дисертация, автореферат на дисертацията, списък и пълните текстове на всички оригинални публикации, залегнали в основата на дисертационния труд.

Дисертационният труд се състои от Увод, 4 глави, Основни приноси и списъци на оригиналните и ползваните литературни източници, като е отпечатан на 125 страници, а авторефератът – на 32 страници.

Авторефератът е ясно структуриран и адекватно отразява съдържанието на дисертацията.

Висшето си образование на физик Ангел Демерджиев завършва през 2012 г. във Физическия факултет на Софийски Университет “Св. Климент Охридски”, като и бакалавърска, и магистърска степен придобива в областта на физиката на плазмата.

### 2. Актуалност на дисертационната тематика. Изследователски задачи и подходи

Плазмените източници с високочестотен (ВЧ) разряд при ниско налягане са обект на засилен интерес за осъществяване на химически синтез, обработка на материали, спектроскопия и др., а в последните около две десетилетия – и при създаването на прототип на термоядрен реактор – токамак.

В устройствата за термоядрен синтез тип токамак трябва да се осигури възможност за инжектиране на снопове от силно ускорени неутрални водородни атоми. Поради големия си обем токамаците изискват висока енергия на инжектираните частици, но неутрализация на силно ускорени йони практически е възможна само ако те са с отрицателен заряд. Типичните (вече реализирани) източници на отрицателни йони се състоят от газоразрядна част, магнитни филтри, зона на разширение, ускорител. В строеж са два източника от матричен тип – SPIDER и MITICA - чиито параметри се очакват да са подходящи за вграждане в ITER.

За успешното създаване на подходящ йонен източник и за неговото оптимизиране продължават да са необходими детайлни изследвания на физичните процеси в него. Сред многобройните традиционни и по-нови задачи за решаване са и задачите, поставени в рецензираната дисертация, посветена на водороден индуктивен разряд при понижено налягане:

- как и къде в разрядния обем се поглъща ВЧ енергията;
- какви са предимствата и недостатъците на различни форми на ВЧ намотка и на постоянно външно магнитно поле, както за единичен разряд, така и за няколко разрядни тръби с общ изход (матрица);

- при какви условия може да имаме преходи между капацитивен и индуктивен мод, и какви физически механизми носят отговорност за единия или другия мод;
- как да съвместим добра ефективност на внасяне на ВЧ енергия в матрица от разряди с хомогенност на изходящата плазма, без да усложняваме прекомерно конструкцията на матрицата;
- може ли да се замени ефективното *повърхностно* създаване на отрицателни йони с *обемно*, без участието на цезий, който е замърсител.

В разглежданите газоразрядни системи физическите механизми са многоплатови и трудни за изучаване, затова авторът прибегва към теоретични пресмятания и физически експеримент - поотделно или в съчетание. И двата подхода са реализирани на едно наистина съвременно ниво. Ще отбележа, че проучванията, описани в дисертационния труд, са част от работата на Групата по физика на плазмата и газовия разряд – Физически факултет на СУ “Св. Климент Охридски” върху матричен плазмен източник на обемно създавани отрицателни водородни йони.

### 3. Характеристика на увода и обзорната част

В първите две части на дисертацията г-н Демерджиев показва, че познава добре състоянието на изследванията в този раздел на плазмената физика.

В увода е даден общ поглед към физиката на плазмените източници при ниско налягане и някои важни технически приложения на тези източници. Показано е и мястото на изследванията, отразени в дисертацията.

В раздел “Литература” са вписани общо 164 заглавия, сред които статиите и докладите са почти всички от последните 20 години, а около 30 от тях са в авторство (или съавторство) от Групата по физика на плазмата и газовия разряд – Физически факултет на СУ “Св. Климент Охридски”.

Преподавател съм в Магистърската програма “Физика на плазмата и термоядрения синтез” на СУ от самото ѝ създаване и я познавам добре. Г-н Демерджиев в обзорната част на дисертацията надгражда, допълва и конкретизира своите познания в тази област, придобити в тази магистърска програма. В Глава 1 той представя важни сведения, включително последните новости, както следва.

- общ преглед на феноменологията и кратко изложение на основните физически механизми във високочестотните разряди при понижено налягане, както индуктивни, така и капацитивни. Особено внимание се обръща на двата мода при индуктивния разряд и преходите между тях.
- Сведения за влиянието на външно магнитно поле върху високочестотните разряди.
- Навлизането на електромагнитно поле в обема на плазмата – образуване на скин слой – при индуктивните разряди.
- Структурата на индуктивните разряди – теории с флуиден и газокинетичен подход.
- Разряди във водород за източници на отрицателни H йони.
- Матрични плазмени източници.
- Диагностика чрез високоскоростна оптическа регистрация и ВЧ модулационна емисионна спектроскопия.

### 4. Характеристика на научните приноси

Следващите три глави описват оригиналните научни резултати, предлагани в дисертационния труд. Разработени са три подтеми, както следва.

*Първата подтема* е разгледана в глава 2 на дисертацията. Формулирана и решена е задача за навлизането на високочестотно електромагнитно поле в полубезкраен плазмен цилиндър. Полето се възбужда от плоска намотка под основата на цилиндъра. По мое мнение, използваният модел отговаря на целите на такова пресмятане в рамките на крайната цел – построяването на матричен плазмен източник, в който радиусът на отделните газоразрядни клетки е относително малък. Освен това, резултатът се получава веднага в аналитична форма, добавяйки лесни числени пресмятания. Самият резултат е в прегледна форма и позволява да се направи извода, че с намаляването на честотата и плазмената плътност започва да преобладава ефектът на малкия радиус. Този ефект (проява на *автомоделност*, *selfsimilarity*) е наречен геометричен скин и е съществена особеност на разрядите с определена геометрия.

*Втората подтема*, предмет на глава 3, е едно експериментално изследване на индуктивни водородни разряди при ниско налягане. Наблюдавани са различни пространствени структури в разряда, които показват наличието на индуктивен или капацитивен мод. Експериментът е успешен заради правилния избор на методиката: свръхвисокоскоростна оптична регистрация. В дисертацията авторите ползват високоскоростен електронно-оптичен преобразувател от най-последно поколение и са преодолели трудности: сигналът е слаб, но процесът е периодичен и с една прецизна фазова синхронизация могат да се “улавят” достатъчен брой фотони във всеки пиксел от образа. Наблюдавани са както усреднената по време, така и променливата компонента на оптичния сигнал след тесноивичен филтър за H $\alpha$  линията – т.н. PROES спектроскопия. Богатият снимков материал в различни разрядни режими, със и без външно постоянно магнитно поле, илюстрира преходи между двата мода. Измерванията на интензивността на спектралната линия е позволило съвсем достоверно да се направят важни изводи за плазмените механизми – диамагнитен дрейф, E $\times$ B дрейф, механизми на нагряване на електроните, възникването на електронни снопове. В един конкретен случай например оценката на електронната дрейфова скорост е  $2 \times 10^6$  м/с, в съгласие с данни от сондова диагностика.

*Третата подтема*, на която е посветена Глава 4, е теоретично моделиране и числени пресмятания на матрица, състояща се от цилиндрични индуктивни разряди с плоска намотка. Тук се търсят ефективно внасяне на ВЧ енергия в газоразрядната плазма, хомогенност на функциониране на целия матричен плазмен източник и осъществима конструкция на възбуждащите намотки. В модела основната тежест е в електродинамичната част и, по-малко – в плазмената. Формулирани са гранични условия както за цялата област на моделиране, така и на границите между повтарящите се клетки. Численото решаване на задачата е осъществено с пакета COMSOL. Получено е пространственото разпределение на индуцираната токова плътност, електронните температура и плътност. Изучени са шест различни конфигурации на възбуждащата намотка, като в последния – най-интересен случай на проводници с повтарящи се извивки с формата на “омега” числените резултати са подкрепени и от собствени експерименти - PROES спектроскопия.

Представените в дисертационния труд оригинални резултати имат не само познавателен характер, но в същото време дават ценни указания при конструирането и оптимизирането на съвременни плазмени източници напр. за микроелектронното производство и допълнителното нагряване на плазмата в инсталации тип токамак. Такъв ясно изразен приложен характер имат, в най-голяма степен, приносите в Глава 4.

Дисертацията описва както теоретико-моделни пресмятания, така и експерименти.

## **5. Публикации и значимост на резултатите**

Резултатите от изследванията по първата подтема – проникване на високочестотно поле в плазма с крайни размери – са публикувани в материалите на най-авторитетната и мащабна международна конференция по плазмени науки – ICPIG, и в материалите на една национална конференция.

Резултатите от изследванията по втората подтема – влияние на външно магнитно поле върху формите на индуктивен ВЧ разряд - са излезли като статия в едно от най-престижните международни списания – Journal of Physics D Applied Physics и в материалите на Europhysics Conf. on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases.

Резултатите от изследванията по третата подтема – внасяне на ВЧ енергия в матрица от разряди с плоска намотка - са излезли в престижни международни списания: една статия в IEEE Trans Plasma Sci. и две статии (текстовете на доклади на междунар. конференции) в Rev. Sci. Instrum. Един доклад е отпечатан в материалите на международна конференция.

Във всички публикации Демерджиев е първи автор.

Казаното дотук ми позволява да твърдя с убеденост, че значимостта на резултатите, описани в дисертационния труд, покрива и даже надминава изискванията за научната степен доктор.

## 6. Забележки.

Нямам критични забележки по същество. Наличието на малък брой (предполагам) печатни грешки не се отразява на качеството и истинността на научните резултати. Няколко фигури са с нечитаеми надписи, но са подробно и точно обяснени в основния текст.

## 7. Заключение

Защитаваният дисертационен труд притежава следните достойнства:

- Резултатите, отразени в дисертацията, представляват новост за дадената област (физика на газоразрядната плазма) и дават насоки при конструирането и оптимизирането на съвременни плазмени източници.
- Дисертантът демонстрира добро познаване на литературата, задълбочено вникване и разбиране на основните проблеми и на подходите, теоретични и експериментални, за решаване на задачи по дадената тематика.
- Публикациите на резултатите в дисертацията са в елитни съвременни световни физически списания и в материали на престижни форуми.

**Поради това препоръчвам на високоуважаемото научно жури към Физическия факултет на СУ „Св. Кл.Охридски” да присъди на Ангел Петров Демерджиев научната и образователна степен „доктор“.**



10-01-2017

проф. дфн Боян Джаков