

РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационния труд на Павлина Иванова Иванова, озаглавен „Изследване на функцията на разпределение на електроните по енергия в плазма на токамак със сонда на Ленгмюр” за придобиване на образователна и научна степен „доктор” по специалността 01.03.16 „Физика на плазмата и газовия разряд (термоядрен синтез)”

Рецензент: доц. д-р Николай Цветанов Герасимов

Докторантката е завършила две бакалавърски специалности – „Физика и математика” и „Теоретична физика” (2004 г., Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски”) и магистърска специалност „Физика” (2007 г., Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски”). През периода 2008 – 2011 е преминала обучение като редовен докторант във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски” по специалност „Физика на плазмата и газовия разряд (термоядрен синтез)”. От 2010 г. е на работа в Института по електроника – БАН на длъжност физик в лаборатория „Физика и техника на плазмата”. Владее английски и руски езици. Участвала е в изпълнението на четири проекта за научни изследвания. Има 11 публикации, в т.ч. четири под печат, в съавторство с учени от България, Чешката република и Словения.

Първите ми впечатления от работата на докторантката са от участието ѝ в Международната школа по вакуумни, електронни и йонни технологии (ВЕЙТ), на която бях дългогодишен ръководител. Във ВЕЙТ 2007 и ВЕЙТ 2009 участва с интересни постерни доклади, този от 2007 г. публикуван по-късно като статия, а на ВЕЙТ 2011 се представи като съавтор на 3 постерни доклада и на поканена пленарна лекция. Първите ми благоприятни впечатления получиха недвусмислено потвърждение от работата ѝ в Института по електроника на БАН. Тя е много добре подготвен физик-експериментатор със солидни теоретични познания, работи прецизно, последователно и всеотдайно.

Целта на дисертационния труд е формулирана в заглавието, именно, изследване на функцията на разпределение на електроните по енергия в плазма на токамак със сонда на Ленгмюр. За постигане на тази цел е съставен план за работа както следва:

1. Проучване на съществуващата литература и заключение относно актуалните задачи в дадената област, датирани към началото на работа върху дисертацията;
2. Изследване приложимостта на метода на първата производна на електронния сондов ток за определяне на плазмения потенциал и функцията на разпределение на електроните по енергии в условията на турбулентна плазма в силно магнитно поле;
3. Експериментална работа на инсталация токамак: подготовка на оборудване за сондова диагностика и снемане (запис) на сондови характеристики. Обработка на опитните данни по метода на първата производна на електронния сондов ток и извличане на данни за плазмения потенциал и функцията на разпределение на електроните по енергии (респективно температурата и концентрацията им) в пристенния слой на плазмата.

Дисертационният труд е изложен на 100 страници формат А4 и се състои от увод, три глави и заключение; броят на представените графични зависимости, илюстрации и снимки е 76; списъкът на ползваната литература включва 98 заглавия.

Мотивите за избора на обекта на изследване, както и обосновката на избраната тема са развити убедително в увода на дисертацията. Изчерпващите се минерални ресурси на планетата и непрестанно влошаващата се екологична обстановка в глобален мащаб са мотивирали армия от учени в търсене на нови, безопасни за живата природа и окръжаващата среда източници на енергия, желателно възобновяващи се и по възможност неизчерпаеми. Пионери в намирането на решение стават И. Тамм и А. Сахаров, които през 1950 г. лансират идеята и разработват теорията на управляемия термоядрен синтез. Малко по-късно техният близък колега и съратник Арцимович създава първия реактор за управляем синтез. Новият тип реактор е наречен **ТОКАМАК**, съкращение на пълното му название на руски език „**Т**Ороидальна **К**амера с **М**Агнитными **К**атушками”. В наши дни, след повече от 50 години интензивни изследвания по проблема във всички водещи научни центрове по света, управляемият термоядрен синтез се счита за един от най-перспективните енергийни източници защото е безопасен, екологично чист, икономически конкурентноспособен, а запасите на планетата от гориво за синтез са практически неизчерпаеми. Израз на големите надежди, които международната общност възлага на управляемия термоядрен синтез е започнатото през 2005 г. изграждане в Кадараш, Франция на нов най-голям токамак ITER (съкращение на пълното название International Thermonuclear Energy Reactor), който да демонстрира самоподдържаща се термоядрена реакция и да докаже, че управляемия термоядрен синтез е бъдещето на голямата енергетика в световен мащаб. В увода по-нататък са обсъдени осъществимите реакции на синтез на леки ядра, обоснован е изборът на деутерий-тритиевата реакция като най-перспективна. Дискутирани са критерия на Лоусън за самоподдържаща се реакция, колебанията, неустойчивостите и турбулентността на плазмата, кинетиката на разряда, и по-специално потенциала на плазмата, функцията на разпределение на електроните по енергия и електронната концентрация, особеностите на пристенния слой плазма. Подчертано е, че явленията в пристенната плазма са сходни независимо от размерите на камерата, което позволява резултатите получени на малък токамак (CASTOR, COMPASS), да бъдат използвани за изясняване на проблемите при големите токамаци JET (съкращение на пълното название Joint European Torus) и ITER.

От заглавието на дисертацията е ясно, че става дума за експериментални изследвания в реактор от типа токамак. Логично, в първата глава са описани физическите основи, принципното устройство, основните характеристики и механизма на работа. Токамакът е сложно устройство и експериментаторът трябва да е запознат добре с дизайна, възможностите и управлението на конкретната машина, измервателната и записваща апаратура и пр. Изложеното в тази глава позволява да заключа, че докторантката не само е преодолела този праг, но е навлязла дълбоко в материята. Описани са индуцирането на плазмения шнур чрез мощен токов импулс в първичната намотка на трансформатора, магнитното удържане на плазмата чрез приложено външно тороидално и генерирано от тока през плазмата полоидално магнитни полета, и не на последно място важни понятия като запас на стабилност, магнитен шир и др. Обърнато е особено внимание на процесите и явленията в пристенния слой на плазмата. Компетентно са дискутирани особеностите на реактори с кръгова и D-образна форма на вакуумната камера, ролята на лимитера и дивертора, методите за допълнително външно нагряване на плазмения шнур, работния режим L-мод и условията за преход към значително по-ефективния H-мод режим. В заключение са направени два важни извода: първо, познаването на характеристиките на плазмата и явленията в пристенния слой е важно за изясняване на цялостната картина на процесите в плазмата; второ, характеристиките на плазмата в пристенния слой могат да бъдат

измерени със сонда на Ленгмюр поради по-ниските стойности на температурата и концентрацията на плазмата в тази зона на реактора.

Уводът и първата глава на дисертацията могат да бъдат характеризирани като задълбочен и обстоен обзор на литературните източници, като много добра обосновка и мотивировка, съответно за актуалността на изучавания обект и за избора на темата. Освен това позволяват да заключа, че докторантката е навлязла дълбоко в проблема, излага материала логически последователно и ясно на много добър език.

Във втората глава е направен литературен обзор върху състоянието на сондовия метод за диагностика на газова плазма към момента на започване на работа по дисертационния труд. Кинетичните характеристики на висококотемпературната плазма в голяма степен се определят от електронната компонента, която най-пълно се описва от функцията на разпределение на електроните по енергия. Един от основните методи за нейното измерване е сондовият. Ленгмюр създава сондовия метод за диагностика на плазмата, а Дрювестейн показва, че при ниско налягане на работния газ функцията на разпределение на електроните по енергия е пропорционална на втората производна на електронния сондов ток. Това става през двадесетте години на миналия век, т.е. десетилетия преди възникването дори на идеята за термоядрен синтез. Класическият сондов метод е приложим за диагностика на плазма при ниско налягане и изпълнение на поредица от други условия. Ето защо дори и днес, много десетилетия след Ленгмюр и Дрювестейн продължават усилията за неговото развитие в посока диагностика на плазма при средни и високи наляганя, при наличие на силни магнитни полета, турбуленции, висока температура и други специални случаи. С голямо удовлетворение отбелязвам, че екипът, член на който е докторантката, заема достойно място сред учените с принос в това отношение. В тази глава подробно са описани и коментирани етапите в развитието на сондовата методика, като се почне от теорията на класическата сонда и формулата на Дрювестейн, мине се през теорията при повишени наляганя, през кинетичния модел в нелокално приближение и се стигне до сонди на Ленгмюр в магнитно поле. Ще си позволя да наруша хронологията на изложението за да изтъкна, че в тази и следващата глава се чувстват ясно двете бакалаварски степени на докторантката („Физика и математика” и „Теоретична физика”), и следствието от тях - отличното владение на методите и апарата на математическата физика.

Основните приноси, с които докторантката кандидатства за образователната и научна степен „доктор” са представени в третата глава и са развити на базата на осем публикации, седем от тях излезли от печат и една приета за печат. Публикувани са в *J. Phys.: Conf. Series* (3 статии), *Plasma Phys. Control. Fusion* (1 статия), *Acta Technica* (1 статия) и *Proc. EPS Conf. Plasma Phys.* (3 статии). Публикуването на тези статии е предшествано от апробация на резултатите на девет международни научни мероприятия. Забелязани са четири независими цитирания в списания *Plasma Sources Sci. and Technol.* и *Plasma Phys. Control. Fusion* на две от публикациите. Считам това за добър атестат, тъй като повечето трудове са излезли от печат през последните две-три години. Нещо повече, за статията, публикувана в *Plasma Phys. Control. Fusion* (публикация под номер А.5) авторите са получили писмо от редакторката на списанието г-жа Caroline Wilkinson, с което ги уведомява, че статията, цитирам „...has been selected to be part of Plasma Physics and Controlled Fusion's Highlights of 2009 Collection”. Редакторката изтъква, че статията е сред най-добрите, публикувани от списанието през 2009 г., сред най-често теглените от сайта през годината, и че е изследване от най-високо качество. Една толкова висока оценка е чест за всеки учен. За

рецензиране приемам както излезлите от печат трудове, така и приетия за печат, тъй като разполагам с ръкописа и съм запознат с положителния отзив на рецензента. Публикациите са логическо продължение на една от друга, съдържат нови данни и резултати. Има някои неизбежни повторения с цел постигане пълнота на изложението в рамките на дадената статия. Написани са интелигентно, грижливо и ясно на добър английски език. Запознаването със статиите в хронологичен ред позволява да се проследи развитието на метода на първата производна за определяне на функцията на разпределение на електроните по енергия по електронната част на сондовата характеристика, неговото апробиране чрез многобройни експерименти и измервания в пристенната област на токамак CASTOR и стъпките за доказване приложимостта му за диагностика на плазмата в силно магнитно поле чрез сравнение с данни, получени по йонната част на сондовата характеристика по метода на Станджеби. Позволява, също така, да се проследи дизайна и усъвършенстването на ювелирната сондова матрица, осъвременяването на измерителната апаратура и развитието на методите за обработка на опитните данни с разработени от колектива нови компютърни програми.

Третата глава на дисертацията е структурирана в три раздела както следва:

1. Теоретични предпоставки за определяне на функцията на разпределение на електроните по енергия и плазмените параметри в пристенна плазма на токамак;
2. Експерименти, измервания и определяне на функцията на разпределение на електроните по енергия и плазмените параметри в токамак CASTOR (Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic);
3. Експерименти, измервания и определяне на функцията на разпределение на електроните по енергия и плазмените параметри в токамак COMPASS (Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic).

В първия раздел на тази глава са обобщени резултати, публикувани в *Plasma Phys. Control. Fusion, Proc. 35th and 36th EPS Conf. Plasma Phys.* и *J. Physics CS* (публикации под номер А.5, А.4, А.6 и А.3 в авторския списък). Изведена е разширена формула за електронния сондов ток на базата на кинетичната теория в нелокално приближение. Определен е вида на дифузионните параметри за сонда, разположена успоредно и перпендикулярно на магнитните силови линии. Развита е метод за определяне на потенциала на плазмата с помощта на първата производна на електронния сондов ток. Показано е, че над определени стойности на дифузионния параметър, връзката на първата производна на електронния сондов ток с функцията на разпределение на електроните по енергия е директна, докато в обратния случай се налага да се отчита добавъчен член.

Вторият раздел обобщава резултатите, публикувани в *J. Phys. CS, Proc. 34th, 35th and 36th EPS Conf. Plasma Phys.* (номера от А.1 до А.4 и А.6 в авторския списък). Описан е токамак CASTOR, приведени са основните му параметри: главен радиус – 400 mm, малък радиус – 85 mm, тороидално магнитно поле – 0.5-1.5 T, плазмен ток – 5-20 kA, дължина на импулса – <50 ms, работен газ – водород, работно налягане – 30-40 mPa. Плазмата в токамака е изследвана с вакуумна ултравиолетова и рьонгенова спектроскопия, болометрия и микровълнова диагностика от няколко колектива други учени, и със сондова диагностика - от колектива, член на който е докторантката. Повече внимание е отделено, разбира се, на сондовата система. Тя включва два набора от цилиндрични ленгмюрови сонди, съответно 16 и 12 на брой, като първият набор е ориентиран перпендикулярно, а вторият - успоредно на магнитните силови линии. Двата набора сонди са монтирани на носачи, които се поставят вертикално в горната

част на вакуумната камера в областта на пристенната плазма, където температурите са по-ниски и главното, поносими за сондите. Те са разположени на разстояние 2.5 mm една от друга и покриват област от около 40 mm в плазмата. Времето за снемане на една волт-амперна характеристика е около 1 ms. Процедурата за определяне на плазменния потенциал, функцията на разпределение на електроните по енергия и електронната концентрация е описана в детайли, като е демонстрирана върху единични волт-амперни характеристики, снети с успоредна и перпендикулярна сонди в постоянната, устойчива фаза на разрядния ток от средата на импулса ($10 \text{ ms} < t < 11 \text{ ms}$). Проведени са многочислени експерименти и измервания, снети и записани са много голям брой сондови характеристики. Всички характеристики са обработени, а избрани от тях - представени в публикациите, цитирани по-горе и в този раздел на глава 3. Дадени са основните параметри на разрядните импулси за тези избрани случаи, именно, напрежението, което се индуцира в единична намотка около тороидалната камера, усреднената по диаметъра на полоидалното сечение на камерата електронна концентрация, измерена с микровълнов интерферометър, токът през камерата на токамака и интензитета на водородната линия H_{α} . От представения богат експериментален материал мога да заключа, че са получени оригинални данни за параметрите на плазмата в пристенния слой, именно, функцията на разпределение на електроните по енергия, плазменния потенциал, електронната концентрация и температурата на плазмата. Твърде интересни са и получените данни за радиалното разпределение на плазмените параметри и особено заключението, че в областта между последната затворена магнитна повърхност и лимитера функцията на разпределение на електроните по енергия е неравновесна, не-Максуелова, а в сянката на лимитера - Максвелова. Важно е да отбележа, че са определени параметрите на плазмата при не-Максуелова функция и е показано, че тя е би- Максвелова, т.е. доказано е наличието на две групи електрони с Максвелова функция, но с различни енергии. Тук е мястото и за най-важното заключение: основният принос на този труд е, че е развита методология за определяне параметрите на плазма в силно магнитно поле по електронната част на сондовата характеристика и за първи път е приложена за диагностициране плазмата на реактор токамак. За потвърждение достоверността на резултатите, получени в този труд по електронната част на сондовата характеристика, плазмените параметри са определени и по йонната част на характеристиките по метода на Станджеби. Намерено е много добро съвпадение на резултатите, освен в случаите на не-Максуелова функция, при които метода на Станджеби е неприложим.

Накрая ще отбележа, че получените резултати са реален принос за изясняване на физическите процеси, протичащи в пристенния плазмен слой на токамака, такива като формиране на транспортни бариери, взаимодействието плазма-стена и турбуленции.

Последният раздел на глава 3 обобщава резултати, публикувани в списания *Acta Technica* и *J. Phys. CS* (под печат), номера А.7 и А.8 в авторския списък. Описани са токамака COMPASS (съкращение на пълното название **COMPact ASSEMBly**) и неговите възможности, проведената експериментална работа и получените резултати. В COMPASS е възможно удържане на плазмата във високотемпературен режим Н-мод (засега все още работи в режим L-мод), вакуумната камера има D-образна форма и е с размери в съотношение 1:10 спрямо тези на изграждащия се сега енергиен реактор ITER. Освен COMPASS, в Европа има само два работещи токамака с ITER конфигурация - JET и ASDEX-U (Институт по физика на плазмата, Гархинг, Германия). Резултатите, получени на тези три реактора са важен източник на информация за проектирането и изграждането на реактора ITER. Описани са основните елементи и системи на COMPASS – вакуумна камера, магнитни бобини и система за допълнително нагряване на плазмата. Наличните 60 порта за достъп във вакуумната камера

предоставят богати възможности за комплектоване с техника за диагностика и нагряване на плазмата. За отбелязване е, че към датата на завършване работата върху дисертационния труд, COMPASS бе все още в пускова фаза за установяване на работен режим, и със само две опериращи диагностични системи - CCD камера и системата от диверторни сонди. Диверторната сондова система се състои от 39 графитни единични ленгмюрови сонди вградени в дивертора. Сондите са разположени полоидално в графитна диверторна плоча и обезпечават измервания с пространствено разрешение 5 mm. Сигнал от диверторните сонди възниква в края на токовия импулс, когато плазмения стълб се разпада и плазмата се премества към стените на камерата. Снемането на сондови характеристики по време на стартовата кампания на COMPASS е било затруднено от нестабилния режим на работа, високото равнище на шумове и др. Независимо от това, успешно са проведени измервания с два работни газа – водород и хелий. Сондовите характеристики са анализирани и обработени по метода на първата производна и по метода на Станджеби, съответно по електронната и по йонната част на волт-амперните зависимости. Констатирано е задоволително съвпадение на резултатите. Допълнителна проверка на метода на първата производна е направена чрез сравнение на моделна сондова характеристика, пресметната по определените плазмени параметри чрез метода на първата производна, с експериментално снетата. Това е направено и за двата работни газа – водород и хелий. И в двата случая моделните криви практически съвпадат с експерименталните, което е убедително доказателство в полза на метода на първата производна. Друг важен резултат е получената информация за функцията на разпределение на електроните по енергия в края на токовия импулс, когато плазмата достига дивертора.

Работата на големи инсталации за физически експеримент е по силите единствено на колектив от учени. Без съмнение реакторите CASTOR и COMPASS са инсталации от този вид. Това обяснява отсъствието на трудове, публикувани от докторантката самостоятелно. Преглед на авторския списък на публикациите показва, че в две работи (А.6 и А.7) докторантката е първи автор, в четири работи (А.2, А.3, А.4 и А.6) – втори и в останалите две (А.1 и А.8) – на друго място. Първи автор на публикациите, на които докторантката е втори автор, е научният ѝ ръководител. Ясно е, че ръководителят е вдъхновител, идеолог и участник в проведените изследвания, а докторантката – непосредствен реализатор. Тези съображения ми позволяват да заключа, че представения материал е в значителна степен лично дело на докторантката. Употребявам израза „значителна степен” единствено за да не омаловажа приноса на останалите членове на колектива.

Авторефератът съответства на съдържанието на дисертацията. Написан е добре, но е ненужно дълъг. Вероятно, поради значителния обем, част от читателите по-скоро ще го прелистват, отколкото четат.

Бележки по същество към дисертацията и автореферата нямам. Имам няколко редакционни препоръки, но те не заслужават обсъждане тук.

Дискусията в тази рецензия по отделните глави на дисертацията завършва с моята положителна, често висока оценка за квалификацията на докторантката и значимостта на постигнатото. Степента, за която кандидатства с този труд е на първо място образователна. В тази връзка ще изтъкна, като добавка към вече изложеното, че глава 2 и първата част на глава 3 могат да бъдат издадени като учебно пособие по сондова диагностика на газова плазма, ако/когато възникне такава необходимост. Що

се отнася до научната част, ще обобща, че са обогатени съществуващи знания, и главното – получени са нови знания за един многобещаващ нов източник на енергия, с който човечеството свързва своето бъдеще.

Моето заключение е, че Павлина Иванова Иванова отговаря напълно на изискванията за присъждане на образователната и научна степен „доктор” по исканата специалност и с пълна убеденост препоръчвам на уважаемото научно жури да ѝ присъди тази степен.

Рецензент:

(доц. д-р Н. Герасимов)

10.02.2012, София