

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационния труд на Ембие Юзеир Хасан-Тонева, озаглавен „Определяне потенциала на плазмата и ФРЕЕ в плазма за термоядрен синтез” 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 възпитаничка на Физическия факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски". Удостоена е с бакалавърска степен по Физика и математика през 2012 г. и с магистърска степен по Термоядрен синтез и плазмени технологии през 2014 г. Завършва докторантура по Физика на плазмата и газовия разряд през настоящата година. От 2012 г. е на работа в Института по електроника – БАН на длъжност физик в лаборатория „Физика и техника на плазмата”. Владее английски език. Участвала е в изпълнението на три проекта за научни изследвания. Съавтор е на 6 публикации, включително 2 в списания с импакт фактор (0,934 и 2,392), една от които е цитирана два пъти в научната литература. Изнесла е устни доклади пред пленарни сесии на 5 международни научни мероприятия и е представила за обсъждане 10 постерни доклада пред други 6 международни научни форуми.

Впечатленията ми от докторантката датират от 2013 г., когато взе участие в работата на шестнадесетата сесия на Международната школа по вакуумни, електронни и йонни технологии (VEIT), на която бях дългогодишен ръководител. На тази и следващите две сесии (2015 и 2017 г.) тя представи за обсъждане интересни постерни доклади, по-късно публикувани/приети за печат в пълен текст в Journal of Physics: Conference Series. Първите ми благоприятни впечатления получиха 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.

Дисертационният труд се състои от увод, три глави и заключение с общ обем 106 страници формат А4, включително 120 графични зависимости, илюстрации и снимки; списъкът на ползваната литература включва 85 заглавия.

В увода на дисертацията са изложени мотивите за избора на обекта на изследване, както и обосновката на избраната тема.

Нарастващите енергийни потребности на човечеството, изчерпващите се минерални ресурси на планетата и влошаващата се екологична обстановка в глобален мащаб са мотивирали търсенето на нови, безопасни за живата природа и окръжаващата среда източници на енергия. Пионери в намирането на решение стават руските учени И. Тамм и А. Сахаров, които през 1950 г. лансират идеята и разработват теорията на управляемия термоядрен синтез, а техният близък колега и съратник Арцимович създава първия реактор за управляем синтез – **Т**Ороидальная **К**Амера с **М**Агнитными **К**атушками, съкратено **ТОКАМАК**. Година по-късно (1951 г.), американският учен Л. Спитцер предлага създаването на затворена магнитна система за удържане на плазмата **СТЕЛАРАТОР**.

Днес управляемият термоядрен синтез се счита за един от най-перспективните енергийни източници защото е безопасен, екологично чист и главно, защото запасите на планетата от гориво за синтез са практически неизчерпаеми.

В увода 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 инсталации Joint European Torus (JET) и International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER).

Измерванията и експериментите, върху които е изградена дисертацията, са проведени в Института по физика на плазмата на Чешката Академия на Науките на токамак COMPACT ASSEMBLY, съкратено COMPASS. Инсталациите за синтез са твърде сложни съоръжения и работата с тях изисква детайлното им познание. Описанието на COMPASS в първата глава на дисертацията убеждава, че това е постигнато от докторантката. Дискутират се възможните конфигурации на плазмата в COMPASS - кръгова, удължена във вертикална посока и D-образна; трите основни системи на токамака – вакуумна камера, магнина инсталация и устройство за допълнително нагряване на плазмата; условията за работа в режими L и H-мод, начините за преход от единия в другия, възникването на гранично локализиращи модове и системата за тяхното контролиране; диверторната сондова система, с която са направени измерванията; сондовия хоризонтален манипулатор, бол-пен сондата за измерване потенциала на плазмата; и накрая, измерителната сондова система, за създаването на която принос има изследователския екип от Физическия факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски", член на който е докторантката.

Резултатите, представени в дисертационния труд, са получени чрез сондови измервания в пристенния плазмен слой на токамак COMPASS. Логично, втората глава е посветена на сондовия метод за определяне на основни плазмени параметри - функция на разпределение на електроните по енергия, температура на електроните и плазмен потенциал.

В литературния обзор е описана класическата сондова методика – сонда на Ленгмюр, условията, при които може да бъде ползвана, формулата на Дрюестейн и метода за обработка на содовата волт-амперна характеристика за определяне параметрите на плазмата. Следва дискусия по кинетичния модел за работа на Ленгмюрова сонда с акцент върху режимите на работа на сондата и кинетичния модел за електронния сондов ток в нелокално приближение. Предвид обекта на изследване – пристенния плазмен слой в токамак COMPASS, основно внимание е отделено на техниките за обработка на волт-амперните характеристики при наличие на силни магнитни полета, конкретно влиянието на магнитното поле върху содовата характеристика, конвенционалните техники и най-вече метода на първата производна за определяне параметрите на плазмата.

От изложеното в увода, първата и втората глави заключавам, че докторантката е проучила подробно литературата, навлязла е дълбоко в материята управляем синтез и сондовия метод за диагностика на плазмата, включително на силно замагнитена плазма.

Експерименталният материал, върху който е изградена дисертацията, е представен и дискутиран в третата глава. Докторантката е направила измерванията по време на пет самостоятелни експеримента, проведени съгласно научния план за работа на токамак COMPASS. При всеки от експериментите плазмата е диагностицирана с различни методи и средства, включително диверторна и бол-пен сондови системи, обект на даденото изследване.

Изучено е влиянието на величината на разрядния ток върху параметрите на водородна плазма в режими L мод. Важният резултат от този експеримент е, че при ниски стойности на тока (до 100 kA) функцията на разпределение на електроните по енергия е Максвелова, а при нарастване на тока възниква би-Максуелово разпределение около външната контактна точка на сепаратрисата с дивертора. Сондовите характеристики са обработени по метода на първата производна и по три-параметричната конвенционална методика. Резултатите за потенциала на плазмата са в добро съгласие, а температура на електроните по конвенционалната методика съответства на тази за високотемпературната група електрони в случай на би-Максуелова функция.

Една от алтернативите за постигане на самоподдържаща се реакция на синтез е допълнителното нагриване на плазмата от външен източник. На токамак COMPASS това може да стане със сноп неутрални атоми с висока енергия. За изясняване влиянието на допълнителното нагриване върху параметрите на плазмата в пристенния слой е проведена серия от измервания в деутериева плазма, D-образна форма и режим L-мод. Снети са сондови волт-амперни характеристики, при едни и същи условия преди и по време на нагриването, за поредица стойности на електронната концентрация $(2 \div 7) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ и на мощността на инжектирания сноп атоми. Анализът на получените резултати показва, че влиянието на допълнителното нагриване върху плазмените параметри при ниска мощност на лъча (ток на източника $\sim 5 \text{ A}$) е съвсем малко. При по-голяма мощност ($\sim 300 \text{ kW}$) и висока концентрация на електроните ($\geq 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) се наблюдава повишаване температурата на електроните, преход на функцията на разпределение на електроните по енергия от Максвелова в би-Максуелова и двойно нарастване на потенциала на плазмата във вътрешната част на дивертора.

При прехода от L в H-мод възникват гранично локализиращи модове, които може да бъдат контролирани чрез прилагане на допълнително магнитно поле, водещо до магнитно-резонансни пертурбации на плазмените параметри. Докторантката е участник в първото изследване на магнитно-резонансните пертурбации на токамак COMPASS. Това първо комплексно изследване е направено чрез поредица от техники и методи за диагностика на плазмата, включително с диверторната сондова система. Експериментите са проведени в деутериева плазма в режим L-мод, разряден ток в интервала $(170 \div 230) \text{ kA}$ и средна концентрация на електроните $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Снети са волт-амперни сондови характеристики като са ползвани и трите режима на работа на диверторните сонди: измерване на плаващия потенциал – директно, и на йонния ток на насищане – чрез подаване на отрицателно или триъгълно напрежение (за волт-амперните характеристики). Освен със сонди, магнитно-резонансните пертурбации са регистрирани и с бърза фото-камера. Направени са голям брой измервания и са получени интересни и стойностни данни за еволюцията на плазмените параметри под въздействието на магнитно-резонансните пертурбации: функцията на разпределение на електроните по енергия, определена по метода на първата производна на сондовия ток, е би-Максуелова и не се променя; профилът на плазмените параметри се разцепва около външната контактна точка, като максимумите на високотемпературната група електрони съответстват на минимумите на всички останали параметри;

нискотемпературната група електрони от би-Максуеловото разпределение не е повлияна и има населеност близка до тази на високотемпературната група, но в нейния профил няма разцепване около външната контактна точка.

Резултатите за плазмените параметри, получени със сонда на Ленгмюр, са сравнени с тези, получени с бол–пен сонда. Измерванията са направени във водородна и в деутериева плазма. Получено е добро съгласие за плазменния потенциал и за температурата на електроните при Максвелово разпределение; при би–Максуелово разпределение, температурата, определена с бол–пен сонда, съвпада с тази на високо-енергетичната електронна група, определена по метода на първата производна на волт–амперната сондова характеристика.

Обработката на сондовите характеристики по метода на първата производна показва, че в околността на сепаратрисата разпределението на електроните по енергия се различава от Максвеловото. От друга страна, конвенционалните техники предполагат наличието именно на Максвелово разпределение. Предвид продължаващите дискусии по въпроса, проведено е изследване на приложимостта на различните техники за обработката на сондовите характеристики. За целта са направени измервания в режим Н–мод, стимулиран от инжектиран сноп неутрални атоми, и наличие на гранично локализираните модове. Записана е поредица сондови характеристики през интервалите от време между гранично локализираните модове. Характеристиките са обработени по метода на първата производна и чрез конвенционалната техника в три и четири–параметрично приближение. Сравнението на резултатите показва, че три–параметричното приближение дава завишени стойности на всички плазмени параметри, а четири–параметричното дава температурата само на високо-енергетичната група електрони. Заключение е, че предимствата на метода на първата производна са убедително показани.

Глава 3 завършва с още едно потвърждение на предимствата на метода на първата производна, направено на основата на пресметнатото радиалното разпределение на плътността на мощността на успоредния топлинен поток в диверторната област.

В последния раздел – Заключение е направено обобщение на всичко, изложено в трите глави на дисертацията.

Приемам за напълно правдива справката за приносите, с които докторантката кандидатства за придобиване на научна степен.

Аз бих сформулирал приносите в три пункта:

- Много голям по обем експериментален материал за характеризиране на плазмата в пристенния слой на токамак COMPASS; експериментите и измерванията са проведени в съответствие с научния план за работа на токамак COMPASS;
- Приложение на сондовия метод за определяне параметрите на плазмата при различни експериментални условия и приложение на метода на първата производна за обработка на сондовите характеристики;
- Обосновка на предимствата на метода на първата производна пред конвенционалната три и четири–параметрична техника за обработка на сондовите характеристики.

Всички публикации на докторантката са в съавторство. В тази връзка ще отбележа, че работата на големи инсталации за физически експеримент от типа COMPASS е по силите единствено на колектив от учени. Това обяснява отсъствието на трудове, публикувани от докторантката самостоятелно и сменя въпроса за личния принос на

докторантката. Тази теза се потвърждава и от приложения към материалите за защита, документ от Института по физика на плазмата към Чешката Академия на Науките.

Авторефератът съответства на съдържанието на дисертацията.

Критични бележки:

–големия по обем фактологичен материал, на места се нуждае от по-подробен анализ, но това е по-скоро препоръка за бъдещата работа, отколкото критика към настоящата; допускам, че се е имало предвид и обстоятелството, че резултатите ще бъдат осмисляни, и възможно ползвани, и от екипите на големите инсталации токамак;

–дисертацията и авторефератът са написани на приемлив език, но определено са се нуждаели от още едно редактиране;

– докторантката свободно борави с общоприетата за управляемия синтез терминология, включително с многобройните съкращения по първите букви на съответните английски думи, което би затруднило евентуални читатели на автореферата, още повече, че някои от съкращенията не са разшифровани.

Накрая ще обобща, че с този дисертационен труд са обогатени съществуващи знания, и главното – получени са нови знания за един многобещаващ и многоочакван нов източник на енергия.

Моето заключение е, че докторантката Ембие Юзеир Хасан-Тонева 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.

20 Март 2018 г.