

СИМПОЗИЈУМ

ДИЈАГНОСТИКА НИСКОТЕМПЕРАТУРНЕ ПЛАЗМЕ И ГАСНИХ ПРАЖЊЕЊА

поводом
50 година научног рада
и 75. рођендана

академика Николе Коњевића

Београд 2015.

Књига абстраката

Академик Никола Коњевић је рођен 1940. године у Београду, дипломирао физичку хемију на Природно-математичком факултету Универзитета у Београду 1963. године. Магистрирао је 1965. године на Одсеку за физику и метеорологију истог факултета. Докторску дисертацију је одбранио 1968. године на Електротехничком факултету Универзитета у Ливерпулу, Енглеска.

Биран је у звање научног сарадника 1969. године, вишег научног сарадника 1974. а за звање научног саветника 1979. Педагошким радом бави се од 1971. када је изабран за доцента на Катедри за физику Природно-математичког факултета у Новом Саду. У звање ванредног професора Електротехничког факултета изабран је 1975, а за редовног професора Физичког факултета 1988. На ЕТФ 1975 уводи по први пут код нас предмет “Квантна електроника - ласери”. 2008. године изабран је за професора емеритуса Универзитета у Београду.

Добитник је Октобарске награде града Београда 1973, и националне награде за физику “Проф.Марко Јарић” 1999. Руководио је бројним националним и међународним научним пројектима укључујући и европски FP-6 пројекат. Уредник је више реномираних међународних научних публикација.

Проф. Коњевић је члан ДФС и EPS, дописни члан Српске академије наука и уметности од 2000. а редовни члан од 2006. године.

Проф. Никола Коњевић је аутор реномиране међународне монографије (Elsevier), 8 прегледних чланака у међународним часописима, 5 прегледних чланака у домаћим часописима, 40 уводних предавања по позиву од којих је већи део штампан у целини, и више од 150 радова у међународним часописима.

САДРЖАЈ

Соња Јовићевић ЛАСЕРИ И ПРИМЕНЕ.....	1
Стевица Ђуровић, Радомир Кобиларов и Зоран Мијатовић ИЗВОРИ ГАСНЕ ПЛАЗМЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ПРОЦЕДУРЕ ЗА ПРОУЧАВАЊЕ ОБЛИКА СПЕКТРАЛНИХ ЛИНИЈА.....	5
Милан С. Димитријевић АПРОКСИМАТИВНЕ ФОРМУЛЕ ЗА НЕВОДОНИЧНЕ СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ АТОМА И ЈОНА.....	9
Миливоје Ивковић СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ ВОДОНИКА И ХЕЛИЈУМОВЕ ЛИНИЈЕ СА ЗАБРАЊЕНИМ КОМПОНЕНТАМА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ ПЛАЗМЕ	13
Милорад М. Кураица ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА И ТЕОРИЈСКА ПРОУЧАВАЊА ШТАРКОВОГ ЕФЕКТА У ГАСНИМ ПРАЖЊЕЊИМА.....	17
Ђорђе Б. Спасојевић КИНЕТИЧКИ ИТЕРАТИВНИ МОДЕЛ ПРОУЧАВАЊА ГАСНИХ ПРАЖЊЕЊА.....	21
УМЕСТО ЗАКЉУЧКА.....	25

ЛАСЕРИ И ПРИМЕНЕ

Соња Јовићевић

*Институт за физику, Универзитет у Београду, Прегревица 118, 11080
Београд e-mail: jovicevic@ipb.ac.rs*

1. УВОД

Ласер је откривен 1960 године. Био је то импулсни рубински ласер који је емитовао зрачење у видљивој области спектра. Убрзо је уследило откриће континуалне ласерске емисије из гасне средине, а затим и из активних средина свих осталих агрегатних стања. Већина ласера представља веома деликатан електро-оптички уређај који садржи компоненте за чију је реализацију требало развити нове врхунске технологије. Зато је тек развој поузданих ласерских компоненти (оптичких, механичких, електричних итд.) и нових ефикаснијих ласерских материјала омогућио многобројне примене. Данас су ласери и ласерски уређаји нашли примену у скоро свим областима науке, индустрије, медицине али и у уметности. Прва искуства са ласерима код нас забележена су у Институту за физику у Београду на импулсном рубинском ласеру, [1]. Крајем 1969. године реализован је CO_2 континуални гасни ласер излазне снаге неколико вати, са намером да повећају осетљивост ласерског интерферометра за детекцију електронске густине. Развој течних ласера са органским бојама започео је 1969. године, само две године после открића ове врсте ласера. Те исте године реализован је импулсни течни ласер са органском бојом родамином 6G, [2,3].

Овде је дат је преглед истраживања и развоја ласера и ласерских уређаја која су остварена у Институту за примењену физику (ИПФ) и Институту за физику (ИФ) у лабораторији за Спектроскопију плазме и ласере чији је дугогодишњи руководилац био проф Никола Коњевић.

2. ЛАСЕРИ И ЛАСЕРСКИ СИСТЕМИ

2.1. Разни ласери. У Институту за примењену физику реализовани су пламени CO ласер континуалне излазне снаге 5 W [4,5], неколико варијанти хемијског HF и DF ласера, од којих је највећи имао континуалну излазну снагу од 120 W [6,7], CO_2 ласер са шупљом катодом [8], азотни ласер, [9], преносни Nd:YAG ласер [10], емулзиони течни ласер [11] и др. Развијене су три варијанте угљендиоксидног ласера: а) Континуални ласер дужине око два метра као део фотоакустичке апаратуре. Ако ради са дифракционом решетком, која омогућује избор таласних дужина емитованог зрачења, има снагу реда вата. У верзији са резонатором који се састоји од два огледала има снагу реда 10 вати. б) Импулсни TEA CO_2 ласер, [12]. Развијене су две верзије, једна са учестаношћу рада ~ 1 Hz и

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

друга са око 30 Hz. У оба случаја то је минијатурни ласер. Достигнуте су енергије од преко 200 mJ при дужини импулса од око 100 ns. Развој овог ласера је укључивао и посебан развој његових најбитинијих делова – специјално профилисаних електрода (Чангов профил) и високонапонског прекидача (spark gap-a).

2.2 Ласерски системи. CO₂ ласерски систем за обраду неметала, развијен на бази континуалног CO₂ ласера излазне снаге 100 W са могућношћу импулсног рада жељене дужине трајања и понављања. Начином рада (импулсни или континуални), дужином трајања импулса зрачења и паузе и излазном снагом ласера управља рачунар који истовремено контролише и положај предмета на X-Y столу. Више детаља о могућностима овог система могу се наћи у [13]. У ИФ је реализован само један уређај 1990. године, и од тада је у сталном погону. *Хирушки CO₂ ласер* је развијен на бази 40 W CO₂ ласера чија се излазна снага и дужина дејства могла подешавати према жељи корисника. Садржао је у себи мали He-Ne ласер који је служио за обележавање места на које делује CO₂ ласер. Вођење ласерског зрака до сочива којим се зрак фокусира на место интервенције врши се оптичким системом са огледалима. Помоћу овог ласерског уређаја извршено је више од 30 хируршких интервенција у гинекологији.

3. КОНТРОЛА ЗАГАЂЕЊА АТМОСФЕРЕ

За рад на контроли загађења атмосфере осим развоја поузданих ласера значајан је био и развој ласерске спектроскопије. Пионирски рад на примени ласера за контролу загађења атмосфере започео је у свету почетком седамдесетих година, јасно указујући на велике могућности ласера у овој области. Повећана је осетљивост и селективност класичних емисионих и апсорпционих спектроскопских метода, омогућена је даљинска детекција гасова, овладано је новим спектроскопским методама заснованим на дво и мултифотонским побудама, развијена спектроскопија бездоплеровског ширења линија итд.

3.1. Ласерска спектроскопија. У првом раду из ове области описана је примена течног ласера са родамином 6G за детекцију трагова натријума у пламену [14]. Резултати овог рада јасно су указали на осетљивост унутар-резонаторске технике за детекцију трагова елемената и да се примена може проширити на органска и неорганска једињења. Као потврда овог закључка били су резултати примене исте технике за детекцију инсектицида са CO₂ ласером [15]. На основу овог рада и већег броја необјављених резултата јасно су уочене главне предности и мане ове технике: задовољавајућа осетљивост за детекцију појединих инсектицида али и недопустиво велика осетљивост на механичке потресе присутне у теренским условима рада. Због поменутог недостатка унутар-резонаторске технике пришло се развоју фотоакустичке спектроскопије и њене примене за детекцију загађивача атмосфере. Постављена је фотоакустичка ћелија и измерени апсорпциони коефицијенти већег броја полутаната на таласним дужинама CO₂ ласера [16,17]. Ласер и фотоакустичка ћелија за поменуте експерименте реализовани су у лабораторијама ИФ и ИПФ.

3.2. Детектори и детекција загађења атмосфере. Важна улога ласера у контроли загађења атмосфере све се јасније препознаје почетком седамдесетих

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

година. Овај тренд је уочен и код нас [18] па се приступило развоју физичких метода на бази ласера за детекцију загађења атмосфере. На основу података о трансмисији зрачења кроз атмосферу и искуствима са CO_2 ласером правилно је изабран овај ласер за детекцију пара органофосфорних једињења (ОФЈ) у атмосфери.

Даљинска детекција је најатрактивнија под условом да се постигне задовољавајућа осетљивост. Техника која се популарно назива ЛИДАР (**L**ight **D**etection and **R**anging - детекција светлости и мерење удаљености) у принципу је веома једноставна. Импулс ласерског зрачења се шаље кроз атмосферу и помоћу телескопа прикупља рефлектовано зрачење. Мери се слабљење рефлектованог сигнала на карактеристичним таласним дужинама на којима су апсорпциони максимуми на основу којих се, поређењем са сигналом на таласном дужином где нема апсорпције, одређује концентрација гаса у атмосфери. Ово је тзв. техника диференцијалне апсорпције која је код нас коришћена за детекцију гасова у атмосфери. У ИПФ прво је реализован најједноставнији лидар [19] са ретрорефлектором на бази комерцијалног импулсног CO_2 ласера. Намена овог лидара била је детекција ОФЈ, док су прве пробе извршене са етиленом, фреоном 12 и амонијаком. Тестирање CO_2 лидара извршено је са ретрорефлектором на удаљености 1,2 км и одређене границе осетљивости од неколико ррб-километара [19]. Охрабрујући резултати иницирали су следећи корак: испитивање могућности реализације CO_2 лидара са топографским ретрорефлектором. Успешно тестирање лидара са CO_2 ласером и топографском метом изведено је са крова ИПФ у Новом Београду 1981 године.

Почетком 80-тих година реализован је лабораторијски модел аутоматског ласерског детектора (ЛАД) користећи искуства са фотоакустичком спектроскопијом. Пошто је детекцију загађења требало вршити у теренским условима било је неопходно да се реализује тзв. затопљени преносни CO_2 ласер без протока радног гаса и без вакуум пумпи, са батеријским напајањем и излазном снагом зрачења од неколико вати. Требало је да ласер аутоматски мења таласну дужину унутар вибрационо-ротационих прелаза CO_2 молекула, што би омогућило да се на основу карактеристичних апсорпционих максимума изврши поуздана идентификација загађивача. Испрекидано ласерско зрачење у фотоакустичкој ћелији кроз коју протиче испитивани гас, генерише звучни сигнал који се региструје техником синхроне детекције. Величина звучног сигнала пропорционална је апсорпционом коефицијенту и концентрацији загађивача. Пошто су апсорпциони коефицијенти раније одређени и максимуми апсорпције познати, овим детектором требало је идентификовати и детектовати концентрацију три органофосфорних једињења (ОФЈ). Реализовани модел је делимично испуњавао постављене захтеве, дајући повремено исправне и задовољавајуће одзиве на присуство ОФЈ а повремено лажне аларме или је престајао да ради. Проблем је био и то што нису могли да се обезбеде узорци гаса са стандардним концентрацијама ОФЈ

4. СПЕКТРОСКОПИЈА ЛАСЕРСКИ ПРОИЗВЕДЕНЕ ПЛАЗМЕ

Последњих година рађена су истраживања у области спектроскопије ласерски произведене плазме (СЛПП). Тако су при условима временски и просторно разложене плазме произведене зрачењем Nd:YAG ласера на чврстој мети на ваздуху одређени параметри Штарковог ширења три линије Mg I и једне линије Mg II, [15]. Под истим експерименталним условима показана је могућност коришћења линије Li I 460.28 nm са забрањеном компонентом за одређивање електронске густине нискотемпературне плазме, [16].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Наука и живот, Св.7 (1965) стр. 107
- [2] N. Konjević, Lj. Ćirković i R. Konjević, V Kongres matematičara, fizičara i astronoma Jugoslavije, Ohrid 1970, Зборник на трудовите, (Скопје) том II, Физика (1972) стр. 435.
- [3] R. Konjević, J. Jovičić, N. Konjević and Lj. Ćirković, Fizika **5** (1973) 17
- [4] V. Popović, Z. Babarogić i N. Konjević, 20 ETAN u pomorstvu, juni 13-15, Zadar (1978), str. 631.
- [5] Z. Babarogić, N. Konjević and M.Trtica, Rev. Sci. Instrum. **51** (1980) 658.
- [6] Z. Babarogić, I. Belić, I. Mendaš i N. Konjević, 22 ETAN u pomorstvu, Zadar (1980), str. 377.
- [7] Z. Babarogić, I. Belić, I. Mendaš and M.Trtica, Rev. Sci. Instr. **53** (1982) 949.
- [8] M. Ivković, N. Konjević, Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) 5610.
- [9] B. Lončarević, S. Jovičević, I. Belić, N. Konjević, 20 ETAN u pomorstvu, Zadar (1978), str. 637.
- [10] V. Popović i N. Konjević, 19 ETAN u pomorstvu, juni 27-29, Zadar (1977), str. 400.
- [11] R. Konjević, Spec. Lett. **21** (1988) 341.
- [12] M.Trtica, P. Vujković Cvijin and I. Mendaš, Opt. Quant. El. **16** (1984) 511.
- [13] M. Ivković, S. Jovičević and N. Konjević, *Applied Physics in Serbia-APS*, May 27-29, 2002, SANU, Belgrade, Contributed papers, p.187.
- [14] R. Konjević and N. Konjević, Spec. Lett. **6** (1973) 177.
- [15] N. Konjević, M. Orlov and M. Trtica, Spec. Lett. **10** (1977) 311.
- [16] N. Konjević and S. Jovičević, Spec. Lett. **12** (1979) 259.
- [17] S. Jovičević, S. Skenderi and N. Konjević, Spec. Lett. **14** (1981) 415.
- [18] I. Mendaš, P. Vujković Cvijin, D. Ignjatijević and G. Milošević, Appl. Phys. B **39**, (1986) 195.
- [14] P. Vujković Cvijin and N. Konjević, Spec. Lett. **13** (1980) 861.
- [15] M. Cvejić, M.R. Gavrilović, S. Jovičević, N. Konjević: Stark broadening of Mg I and Mg II spectral lines and Debye shielding effect in laser induced plasma, Spectrochimica Acta Part B 85 (2013) 20–33
- [16] M. Cvejić, E. Stambulchik, M.R. Gavrilović, S. Jovičević, N. Konjević : Neutral lithium spectral line 460.28 nm with forbidden component for low temperature plasma diagnostics of laser-induced plasma, Spectrochimica Acta Part B 100 (2014) 86–97

ИЗВОРИ ГАСНЕ ПЛАЗМЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ПРОЦЕДУРЕ ЗА ПРОУЧАВАЊЕ ОБЛИКА СПЕКТРАЛНИХ ЛИНИЈА

Стевица Ђуровић, Радомир Кобиларов и Зоран Мијатовић

*Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за
физику, Трг Доситеја Обрадовића 4, 21000 Нови Сад
e-mail: djurovic@uns.ac.rs*

1. УВОД

Плазма је високо јонизовани гас, тј. смеша неутралних атома, јона и електрона, код којег је остварена колективна интеракција. Строга дефиниција плазме захтева такође, примену принципа детаљне равнотеже и још неке услове о којима овде, због ограниченог простора, неће бити речи. Такву идеалну плазму је веома тешко остварити. Због тога се користе изрази као што су ниско или високо температурна плазма, равнотежна или неравнотежна плазма и слично. Називи могу потицати и од тога како је плазма произведена, на пример, лучна плазма, импулсна плазма, високофреквентна плазма итд.

Плазма је интересантна за истраживања из два разлога. Један је примена плазме у тзв. плазма технологијама, а други је чисто научни интерес, али добијени резултати углавном касније могу бити примењени. У лабораторији се плазма добија најчешће различитим типовима електричног пражњења кроз гас, при ниском или атмосферском притиску. Истраживања се обично врше посматрањем електромагнетног зрачења које плазма емитује.

2. ИЗВОРИ ПЛАЗМЕ И СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ

Постоји веома велики број различитих варијанти гасних пражњења. У институту за физику у Земуну се као извори користе z-пинч, импулсни лук, ласерски произведена плазма, стабилисани лук и извор микроталасно индуковане плазме. На физичком факултету у Београду, у једној лабораторији, осим електромагнетне T-цеви, извори су тињаво пражњење Гримовог типа, шупља катода, а рађена су и електролитичка пражњења. У другој лабораторији су то квазистационарни плазма убрзивач, више врста баријерног пражњења, а истраживано је и електростатичко конфинирање плазме. На Департману за физику ПМФ у Новом Саду се као извори плазме користе, зидом стабилисани електрични лук, импулсни лук на атмосферском притиску, електромагнетна ударна T-цев и варница.

За испитивање облика спектралних линија неопходно је да извори плазме задовољавају одерђене услове. Код континуалних извора је потребна стабилност током времена, а код импулсних репродуцибилност. Потребно је обратити

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

пажњу на хладне слојеве плазме у близини електрода или зидова суда као и на појаву самоапсорпције дуж хомогеног слоја плазме. Посматрано радијално, плазма је обично нехомогена, па се за добијање локалних параметара као и профила линија које одговарају тим параметрима плазме, мора применити Абелова инверзија [1]. Свакако мора се водити рачуна и о спектралним карактеристикама оптичког и детекционог система за снимање спектралних линија као и о електричним карактеристикама кола за пражњење.

Тематика истраживања као и конструкција поменутих извора плазме је највећим делом била под руководством професора Николе Коњевића.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Код тињавих пражњења најчешће је коришћен извор Гримоваг типа [2-4] као и шупља катода [5-7]. Испитиване су и особине електролитичких пражњења [8], микроталасно индуковане плазме, на атмосферском притиску [9] и ниском притиску [10], као и ласерски произведене плазме [11]. Карактеристике баријерног пражњења су, на пример, описане у [12], а плазме произведене квазистационарним плазма убрзивачем у [13]. Испитиване су и карактеристике короналног пражњења [14].

Посебно је разматрана могућност коришћења неводоничних спектралних линија за дијагностику плазме ниских електронских концентрација при вишим притисцима [15].

Овде ће, мало детаљније, бити речи о неколико извора плазме где преовладава ширење спектралних линија услед притиска, односно услед Штарковог ефекта и о истраживањима у нашим лабораторијама. Углавном ће бити речи о проучавању облика и помераја спектралних линија у плазми.

Зидом стабилисани електрични лук је континуални извор плазме и ради на атмосферском притиску. Температура плазме на оси лука је око 10000 К, а електронска концентрација је од $0.2 \cdot 10^{22}$ до $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$, али опадају према зидовима канала. Мерени су Штаркови параметри спектралних линија неутралних елемената [16 - 18].

За мерење Штаркових параметара спектралних линија, емитованих од стране јона, углавном је коришћен z-пинч [19-21]. Остварене су електронске температуре од 32000 К до 36000 К, а електронске концентрације између 10^{23} m^{-3} и 10^{24} m^{-3} . Коришћена је и импулсна бљескалица [22], а започет је и рад на импулсном, зидом стабилсаном електричном луку [23], на атмосферском притиску [24]. У импулсима се достиже електронска температура од 14500 К, док је електронска концентрација већа за ред величине у односу на ону када лук ради у једносмерном режиму. За раздвајање утицаја ширења услед Штарковог и доплеровог ефекта и инструменталног ширења подразумеван је симетрични Војтов профил и коришћен је стандардни метод деконволуције тј. раздвајања ових утицаја.

Зидом стабилисани лук као и импулсни лук на ниском притиску су коришћени за испитивање облика спектралних линија емитованих од стране неутралних атома. Код импулног лука је остварена електронска концентрација од (2.5 – 5.9)

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

$\times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ а температура између 19000 К и 23000 К. Штарков профил спектралне линије је у овом случају асиметричан тако да је и резултантни, експериментални профил, линије асиметричан. Развијен је модел за деконволуцију оваквог профила [25, 26]. На основу тог модела мерен је и јонски параметар ширења [27].

За испитивање утицаја динамике јона на облик спектралних линија неутралних атома коришћени су z-пинч [28] и импулсни лук на ниском притиску [29, 30].

Електромагнетна ударна Т-цев је коришћена за испитивање динамике плазме [31], развоја хладних слојева уз зид суда [32], за изучавање облика Н-бета линије [33, 34], као и за мерење Штаркових параметара [35-37]. У случају водоничне плазме достигнута је температура до 42000 К, а електронска концентрација до $8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

Кончани резултати, тј. одређени облици спектралних линија и њихови параметри морају бити праћени подацима дијагностике плазе тј. подацима о измереној електронској концентрацији и температури плазме.

Треба још напоменути да су у списку литературе поменути само неки радови у вези са поменутом тематиком. Побројати све шта је рађено у нашим лабораторијама далеко премашује оквире овог текста. Постоји такође интензивна и успешна сарадња са колегама из иностраних институција, али би томе морао бити посвећен посебан текст.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Djurović, S., *J. Res. Phys.* **28**, 153-164 (1999)
- [2] Kuraica, M., Konjević, N., Platiša, M., and Pantelić, D., *Spectrochim. Acta B* **47**, 1173-1186 (1992)
- [3] Videnović, I. R., Konjević, N., and Kuraica, M. M., *Spectrochim. Acta B* **51**, 1707-1731 (1996)
- [4] Majstorović, G. Lj., Ivanović, N. V., Šišović, N. M., Djurović, S., and Konjević, N., *Plasma Sources Sci. Technol.* **22**, 045015 p10 (2013)
- [5] Jovović, J., Šišović, N. M., and Konjević, N., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 235202 p8 (2008)
- [6] Spasojević, Dj., Cvejić, M., Šišović, N. M., and Konjević, N., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 241501 p3 (2010)
- [7] Obradović, B. M., Ivković, S. S., Cvetanović, N., and Kuraica, M. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 015021 p7 (2014)
- [8] Jovović, J., Stojadinović, S., Šišović, N. M., and Konjević, N., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **113**, 1928-1937 (2012)
- [9] Jovičević, S., Ivković, M., Pavlović, Z., and Konjević, N., *Spectrochim. Acta B: Atom. Spectrosc.* **55**, 1879-1893 (2000)
- [10] Jovović, J., Šišović, N. M., and Konjević, N., *Vacuum* **85**, 187-192 (2010)
- [11] Konjević, N., Ivković, M., and Jovičević, S., *Spectrochim. Acta B: Atom. Spectrosc.* **65**, 593-602 (2010)
- [12] Ivković, S. S., Sretenović, G. B., Obradović, B. M., Cvetanović, N., and Kuraica, M. M., *J. Phys. D - Appl. Phys.* **47**, 055204 p10 (2014)
- [13] Dojčinović, I. P., Kuraica, M. M., Obradović, B. M., Cvetanović, N., and Puric, J., *Plasma Sources Sci. Technol.* **16**, 72-79 (2007)
- [14] Sretenović, G. B., Obradović, B. M., Kovačević, V. V., and Kuraica, M. M., *Curr. Appl. Phys.* **13**, 121-129 (2013)
- [15] Djurović, S., and Konjević, N., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 035011 p8 (2009)
- [16] Djurović, S., Konjević, R., Platiša, M., and Konjević, N., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **21**, 739-748 (1988)
- [17] Djurović, S., and Konjević, N., *Z. Phys. D - At. Mol. and Clust.* **10**, 425-430 (1988)
- [18] Djurović, S., Mijatović, Z., Kobilarov, R., and Konjević, N., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **57**, 695-701 (1997)

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

- [19] Popović, M. V., Platiša, M., and Konjević, N., *Astron. Astrophys.* **41**, 463-465 (1975)
- [20] Kobilarov, R., and Konjević, N., *Phys. Rev. A* **41**, 6023-6031 (1990)
- [21] Blagojević, B., Popović, M. V., Konjević, N., and Dimitrijević, M. S., *Phys. Rev. E* **54**, 743-756 (1996)
- [22] Uzelac, N. I., and Konjević, N., *Phys. Rev. A* **33**, 1349-1355 (1986)
- [23] Djurović, S., Mijatović, Z., Kobilarov, R., and Savić, I., *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 025007 p9 (2012)
- [24] Gajo, T., Mijatović, Z., Savić, I., Djurović, S., and Kobilarov, R., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **127**, 119-129 (2013)
- [25] Mijatović, Z., Kobilarov, R., Vujičić, B. T., Nikolić, D., and Konjević, N., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **50**, 329-335 (1993)
- [26] Nikolić, D., Mijatović, Z., Djurović, S., Kobilarov, R., and Konjević, N., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **70**, 67-74 (2001)
- [27] Nikolić, D., Djurović, S., Mijatović, Z., Kobilarov, R., Vujičić, B., and Ćirišan, M., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **86**, 285-298 (2004)
- [28] Kobilarov, R., Konjević, N., and Popović, M. V., *Phys. Rev. A* **40**, 3871-3879 (1989)
- [29] Mijatović, Z., Konjević, N., Kobilarov, R., and Djurović, S., *Phys. Rev. E* **51**, 613-618 (1995)
- [30] Mijatović, Z., Konjević, N., Ivković, M., and Kobilarov, R., *Phys. Rev. E* **51**, 4891-4896 (1995)
- [31] Djurović, S., Mijatović, Z., Vujičić, B., Kobilarov, R., Savić, I., and Gavanski, L., *Phys. Plasmas* **22**, 013505 p8 (2015)
- [32] Pavlov, M., Djurović, S., Vujičić, B., Kobilarov, R., and Mijatović, Z., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 015018 p7 (2009)
- [33] Djurović, S., Nikolić, D., Savić, I., Sörge, S., and Demura, A. V., *Phys. Rev. E* **71**, 036407 p15 (2005)
- [34] Djurović, S., Ćirišan, M., Demura, A. V., Demchenko, G. V., Nikolić, D., Gigosos, M. A., and González, M. Á., *Phys. Rev. E* **79**, 046402 p14 (2009)
- [35] Konjević, N., Labat, J., Ćirković, Lj., and Purić, J., *Z. Phys.* **235**, 35-43 (1970)
- [36] Mijatović, Z., Pavlov, M., Djurović, S., Vujičić, B., Kobilarov, R., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **46**, 557-563 (1991)
- [37] Gigosos, M. A., Djurović, S., Savić, I., González-Herrero, D., Mijatović, Z., and Kobilarov, R., *Astron. Astrophys.* **561**, A135 p13 (2014)

АПРОКСИМАТИВНЕ ФОРМУЛЕ ЗА НЕВОДОНИЧНЕ СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ АТОМА И ЈОНА

Милан С. Димитријевић

*Астрономска опсерваторија, Волгина 7, 11060 Београд, Србија
e-mail: mdimitrijevic@aob.bg.ac.rs*

1. УВОД

Заједно са Николом Коњевићем објавили смо апроксимативне методе за прорачун Штаркових ширина и помака неводоничних спектралних линија, како за јонске [1-3] тако и за неутралне [4] емитере. Оне су нашле велику примену, нарочито у астрофизици и цитиране су више стотина пута. Овде ћемо детаљније приказати Модификовани семиемпиријски метод (МСЕ) [1,2] и његову упрошћену варијанту [3].

2. МОДИФИКОВАНИ СЕМИЕМПИРИЈСКИ МЕТОД ЗА ШТАРКОВО ШИРЕЊЕ И АСТРОФИЗИЧКЕ ПРИМЕНЕ

МСЕ метод [1,2] за прорачун параметара Штарковог ширења изолованих спектралних линија неводоничних јона, успешно је примењен много пута за различите проблеме у астрофизици и физици. Према овом прилазу [1-3,5-8], пуна ширина изоловане јонске линије на половини максималног интензитета (FWHM) услед судара са електронима је

$$w_{\text{MSE}} = N \frac{4\pi \hbar^2}{3c m^2} \left(\frac{2m}{\pi kT} \right)^{1/2} \frac{\lambda^2}{3^{1/2}} \cdot \left[\sum_{\ell_i \pm 1} \sum_{L_i J_i'} \mathcal{R}_{\ell_i, \ell_i \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{\ell_i, \ell_i \pm 1}) + \sum_{\ell_i \pm 1} \sum_{L_i J_i'} \mathcal{R}_{\ell_i, \ell_i \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{\ell_i, \ell_i \pm 1}) \right. \\ \left. + \left(\sum_{i'} \mathcal{R}_{i i'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_i, n_i + 1}) + \left(\sum_{f'} \mathcal{R}_{f f'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_f, n_f + 1}) \right],$$

где је почетни енергетски ниво означен са i , крајњи са f , а сума квадрата матричних елемената \mathcal{R} за разлику главних квантних бројева $\Delta n \neq 0$, је

$$\left(\sum_{k'} \mathcal{R}_{k k'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} = \left(\frac{3n_k^*}{2Z} \right)^2 \frac{1}{9} (n_k^{*2} + 3\ell_k^2 + 3\ell_k + 11)$$

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

у Кулоновој апроксимацији. При томе је

$$x_{\ell_k, \ell_{k'}} = \frac{E}{\Delta E_{\ell_k, \ell_{k'}}}, \quad k = i, f,$$

где је $E=3/2kT$, кинетичка енергија електрона а

$$\Delta E_{\ell_k, \ell_{k'}} = |E_{\ell_k} - E_{\ell_{k'}}|$$

$$x_{n_k, n_{k+1}} \approx \frac{E}{\Delta E_{n_k, n_{k+1}}},$$

а за $\Delta n \neq 0$ енергетска разлика између нивоа са n_k и n_{k+1} је процењена као

$$\Delta E_{n_k, n_{k+1}} \approx 2Z^2 E_H / n_k^{*3},$$

при чему је

$$n_k^* = [E_H Z^2 / (E_{ion} - E_k)]^{1/2}$$

ефективни главни квантни број, Z резидуално наелектрисање јона, односно наелектрисање остатка које „види“ оптички електрон, то јест електрон који врши прелаз ($Z=1$ за неутралне атоме, 2 за једноструко наелектрисане јоне ...) и E_{ion} одговарајућа граница спектралне серије. N и T су електронска густина и температура, док су са $g(x)$ [9] и $\check{g}(x)$ [1] означени одговарајући Гаунт фактори.

У поређењу са потпуним семикласичним [10-12], и Гримовим семиемпиријским прилазом [9], за који треба практично исти сет атомских података као и за најсофистициранији семикласични, за модификовани семиемпиријски метод [1-3,5-8] потребно је знатно мање таквих података. У ствари, ако нема нивоа за које су претпостављене апроксимације јако нарушене, за прорачун Штаркове ширине, потребни су само енергетски нивои са $\Delta n = 0$, пошто је допринос свих нивоа са $\Delta n \neq 0$, који су потребни за потпуни семикласични прорачун и Гримову семиемпиријску формулу, приближно збирно процењен.

Услед потребе за знатно мањим бројем атомских података МСЕ метод је посебно користан за звездану спектроскопију, за коју су потребни атомски подаци и подаци о параметрима ширења за веома обимну листу елемената и спектралних линија, при чему није могуће у свим случајевима од интереса применити софистициране теоријске методе.

Осим тога, у случају комплекснијих атома или вишеструко наелектрисаних јона, услед недостатка тачних атомских података потребних за прецизније прорачуне, поузданост семикласичних резултата опада. У таквим случајевима, МСЕ метод може такође бити интересантан.

УПРОШЋЕНА МСЕ ФОРМУЛА

За астрофизичке потребе, од посебног интереса може бити упрошћена МСЕ формула [3] за Штарково ширење изолованих линија, једноструко и вишеструко наелектрисаних неводоничних јона, применљива у случају када је ниво најближи горњем и доњем нивоу прелазу, на који је могућ диполно дозвољени

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

прелаз са почетног (i) или крајњег (f) енергетског нивоа разматране линије, тако далеко да је услов

$$x_{if} = E/|E_f - E_i| \leq 2$$

задовољен. У таквом случају, пуна ширина на половини максималног интензитета дата је изразом [76]:

$$W(\text{Å}) = 2.2151 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2(\text{cm})N(\text{cm}^{-3})}{T^{1/2}(\text{K})} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \sum_{j=i,f} \left(\frac{3n_j^*}{2Z}\right)^2 (n_j^{*2} - \ell_j^2 - \ell - 1).$$

Овде, $E = 3kT/2$ је енергија пертурбујућег електрона, $Z-1$ је наелектрисање јона а n^* ефективни главни квантни број. Ова формула је од интереса за одређивања обилности, као и за истраживања звезданих атмосфера, пошто су услови важења често задовољени у условима звездане плазме.

Модификовани семиемпиријски метод тестиран је више пута на бројним примерима [13]. Да би се проверио, експериментални подаци за 36 мултиплета (7 различитих врста јона) троструко наелектрисаних јона упоређени су са теоријским ширинама линије и добијени следећи усредњени односи мерених и теоријских вредности [1]: за двоструко наелектрисане јоне 1.06 ± 0.32 а за троструко наелектрисане 0.91 ± 0.42 . Претпостављена тачност МСЕ формуле је око $\pm 50\%$, али је показано [8,14,15] да чак и у случају емитера са веома комплексним спектрима (нпр. Хе II и Кр II), МСЕ метод даје веома добро слагање са експериментом (у интервалу $\pm 30\%$). На пример за Хе II, 6s-6p прелазе, средњи однос између експерименталних и теоријских ширина линије је 1.15 ± 0.5 [14].

У низу радова, помоћу МСЕ метода су израчунате Штаркове ширине, а у неким случајевима и помаци, за спектралне линије следећих елемената: Ar II, Fe II, Pt II, Bi II, Zn II, Cd II, As II, Br II, Sb II, I II, Хе II, Mn II, La II, Au II, Eu II, V II, Ti II, Kr II, Na II, Y II, Zr II, Sc II, Nd II, Be III, В III, S III, C III, N III, O III, F III, Ne III, Na III, Al III, Si III, P III, S III, Cl III, Ar III, Mn III, Ga III, Ge III, As III, Se III, Zn III, Mg III, La III, V III, Ti III, Bi III, Sr III, Cu III, Co III, Cd III, Nb III, В IV, Cu IV, Ge IV, C IV, N IV, O IV, Ne IV, Mg IV, Si IV, P IV, S IV, Cl IV, Ar IV, V IV, Ge IV, Zr IV, C V, O V, F V, Ne V, Al V, Si V, N VI, F VI, Ne VI, Si VI, P VI, и Cl VI.

Почели смо да имплементирамо ове резултате, у облику погодном за унос у компјутер, у базу података STARK-B (<http://stark-b.obspm.fr/>, [16-18], која садржи теоријски одређене параметре Штарковог ширења спектралних линија неводоничних атома и јона, а намењена је дијагностици, моделирању и истраживању звезданих атмосфера, дијагностици лабораторијске плазме и истраживању, анализи и моделирању ласерски произведене плазме, истраживањима везаним за инерцијалну фузију и плазме у технологији. База података STARK-B је део Виртуалног центра за атомске и молекуларне податке (Virtual Atomic and Molecular Data Center – VAMDC, <http://www.vamdc.org/>, [19,20]). Линк за STARK-B постоји и у оквиру Српске виртуалне опсерваторије

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

(Serbian Virtual Observatory - SerVO, <http://servo.aob.rs>, [21]), а планирано је да у оквиру ње буде и одговарајући мирор сајт.

Горе поменути приближни методи настали су првенствено због потребе теоријске интерпретације експерименталних резултата, нарочито када су у питању експериментална истраживања Штарковог ширења вишеструко наелектрисаних јона. Наиме у време настанка ових формула, лабораторија Николе Коњевића је у тој проблематици била водећа у светским размерама и већина постојећих експерименталних резултата о Штарковом ширењу линија вишеструко наелектрисаних јона потицала је из ње, па је рад на њиховој теоријској интерпретацији и провери био веома важан. Формуле су нашле значајну примену, нарочито у астрофизици, с обзиром да је на пример за моделирање звезданих атмосфера или прорачунавање трансфера зрачења кроз њих потребно узети у обзир огроман број спектралних линија. Упрошћена МСЕ формула, која даје ширину спектралне линије у аналитичком облику, ушла је стога у поједине програме за моделирање звезданих атмосфера, пренос зрачења и прорачуне њихове непрозрачности

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dimitrijević, M. S. and Konjević, N., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **24**, 451-459 (1980).
- [2] Dimitrijević, M. S. and Konjević, N., in *Spectral Line Shapes*, ed. B.Wende, W. de Gruyter, Berlin, New York, 1981, 211-239.
- [3] Dimitrijević, M. S. and Konjević, N., *Astron. Astrophys.*, **172**, 345-349 (1987).
- [4] Dimitrijević, M. S., Konjević, N., *Astron. Astrophys.* **163**, 297-300 (1986)
- [5] Dimitrijević, M. S. and Kršljanin, V., *Astron. Astrophys.*, **165**, 269-274 (1986).
- [6] Dimitrijević, M. S. and Popović, L. Č., *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, **101**, 583-586 (1993).
- [7] Dimitrijević, M. S. and Popović, L. Č., *J. Appl. Spectrosc.*, **68**, 893-901 (2001).
- [8] Popović, L. Č. and Dimitrijević, M. S., 1996, *Phys. Scripta*, 53, 325-331.
- [9] Griem, H. R., *Phys. Rev.*, **165**, 258-266 (1968).
- [10] Griem, H. R., *Spectral Line Broadening by Plasmas*, Academic Press, New York and London, 1974.
- [11] Sahal-Bréchet, S., *Astron. Astrophys.*, **1**, 91-123 (1969).
- [12] Sahal-Bréchet, S., *Astron. Astrophys.*, **2**, 322-354 (1969).
- [13] Dimitrijević, M. S., *J. Appl. Spectrosc.*, **63**, 684-689 (1996).
- [14] Popović, L. Č. and Dimitrijević, M. S., *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, **116**, 359-365 (1996).
- [15] Popović, L. Č. and Dimitrijević, M. S., *Astron. Astrophys. Suppl., Series*, **127**, 295-297 (1998).
- [16] Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M.S., Moreau, N., Ben Nessib, N., SF2A Conf. 515-521 (2014).
- [17] Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M.S., Moreau N., STARK-B database, [online]. Available: <http://stark-b.obspm.fr> [June 9, 2015]. Observatory of Paris, LERMA and Astronomical Observatory of Belgrade, 2015.
- [18] Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M. S., Moreau, N., Ben Nessib, N., *Phys. Scr.*, **90**, 054008 (1-6)(2015) .
- [19] Dubernet, M. L., Boudon, V. J., Culhane, L., Dimitrijević, M. S., Fazliev, A. Z., Joblin, C., Kupka, F., Leto, G., et al., *JQSRT*, **111**, 2151-2159 (2010), (<http://www.vamdc.org/>)
- [20] Rixon, G., Dubernet, M. L., Piskunov, N., Walton, N., Mason, N., Le Sidaner, P., Schlemmer, S., Tennyson, J., et al., 2011, 7th International Conference on Atomic and Molecular Data and their Applications –ICAMDATA-2010, AIP Conf. Proc., 1344, 107
- [21] Jevremović, D., Dimitrijević, M. S., Popović, L. Č., Kovačević, A., Vujčić, V., Protić-Benišek, V. et al., 2012, Proc. 13th Int. Conf. CompSysTech12, (Computer Systems and Technologies), eds. B. Rachev, A., Smrikarov, ACM Press, New York, ACM ICPS, 630, 399

СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ ВОДОНИКА И ХЕЛИЈУМОВЕ ЛИНИЈЕ СА ЗАБРАЊЕНИМ КОМПОНЕНТАМА ЗА ДИЈАГНОСТИКУ ПЛАЗМЕ

М. Ивковић

*Институт за физику, Универзитет у Београду, Прегревица 118, 11080 Београд
e-mail: ivke@ipb.ac.rs*

1. УВОД

Убрзан развој плазма технологија и потреба за оптимизацијом ових технолошких процеса намеће непрекидну потребу за развојем различитих дијагностичких техника. Оптичка емисиона спектроскопија је свакако једна од најважнијих техника за дијагностику плазме услед своје непертурбујуће природе. Анализа астрофизичких плазми, провера теорија као и одређивање вероватноће прелаза атома и јона, параметара ширења спектралних линија итд, дају додатни импулс развоју ових спектроскопских метода. Најчешћа коришћена спектроскопска метода је мерење облика и помераја спектралних линија водоника и хелијума. Разлог за то су велика ширина водоникових линија услед линеарног Штарковог ефекта и бројне примене хелијумских плазми.

Цепање нивоа под дејством електричног поља указује на веома комплексне структуре линија водоника. Услед тога, резултате теоријских прорачуна облика ових линија није могуће представити аналитички већ се дају само у облику табела. За описивање облика линија водоника коришћене су различите теорије, ближе описане у докторској дисертацији под руководством професора Николе Коњевића [1]. За примену ових линија за дијагностику густине електрона у плазми, N_e поред поређења експерименталних и теоријских профила често су коришћене и апроксимативне формуле које повезују полуширину линија са N_e . Ове формуле добијене су или на основу експерименталних мерења полуширина линија и независном методом одређених N_e , или на основу табела теоријских профила. У овом предавању биће презентовани резултати наших истраживања у области примене водоничних линија у различитим областима вредности N_e .

Комплексна структура хелијумових линија са забрањеним компонентама често служи за проверу исправности теорија Штарковог ширења и померања спектралних линија у плазми. Повезаност различитих параметара ових профила са N_e омогућава и њихову примену за дијагностику плазме, о чему говоре бројни радови професора Коњевића и његових сарадника, који ће овде бити приказани.

2. СПЕКТРАЛНЕ ЛИНИЈЕ ВОДОНИКА

Најстарија метода која се може користити за процену N_e заснива се на њеној вези са главним квантним бројем последње линије Балмерове серије која се може

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

Детектовати се заснива на Инглис-Телеровој (Inglis-Teller) формули:

$$\log (N_e [\text{cm}^{-3}]) = 23.26 - 7.5 \log n_{\max} \quad (1)$$

Ова релација врло је корисна за одређивање врло ниских густина електрона [2].

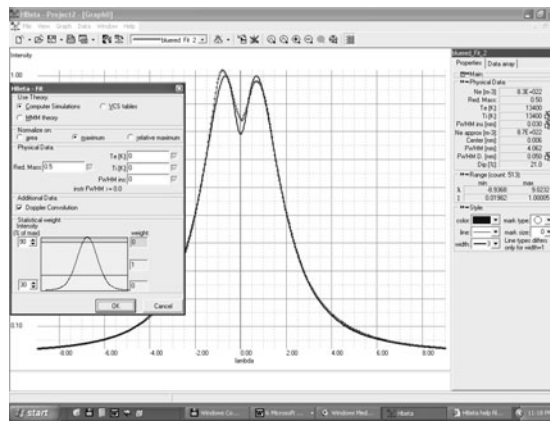
Најчешћа метода за дијагностику N_e у плазми заснива се на мерењима облика или полуширине Балмер бета линије. У пракси се за процену N_e најчешће примењују различите апроксимативне формуле [3-4]. Тестирања су показала да је за зависност N_e од Штаркове полуширине, w_s најприхватљивије користити експериментално одређену формулу Визеа (Wiese) у комбинацији са деконволуционом формулом Келера (Kelleher).

$$N_e (\text{cm}^{-3}) = 10^{16} * (w_s / 4.74)^{1.49} \quad (2)$$

$$w_s = (w_m^{1.4} - w_{D,i}^{1.4})^{1/1.4} \quad w_{D,i} = (w_D^2 + w_i^2)^{0.5} \quad (3)$$

где су w_m – мерена полуширина и $w_{D,i}$ - полуширина услед Доплеровог и инструменталног ширења. Вредности тако одређених N_e користе се и као почетне вредности при фитовања профила.

Највећа тачност одређивања N_e добија се поређењем експерименталних и теоријских профила друге линије Балмерове серије водоника, H_β . У ту сврху развијени су и програми детаљно описани у [3-4]. Константовано је да су сви програми до тада користили су теоријске табеле добијене помоћу обједињене теорије Видал Купер Смита (Vidal, Cooper, Smith), VCS која није узимала у обзир утицај динамике јоне при прорачуну. У циљу побољшања тачности фитовања експерименталног прогила линија, развијен је програм који омогућава генерисање профила коришћењем табела различитих теорија, искључивање жељених тачака при поређењу уз узимање у рачун инструменталног и Доплеровог ширења [5]. Изглед главног менија Windows верзије овог програма приказан је на Слици 1.

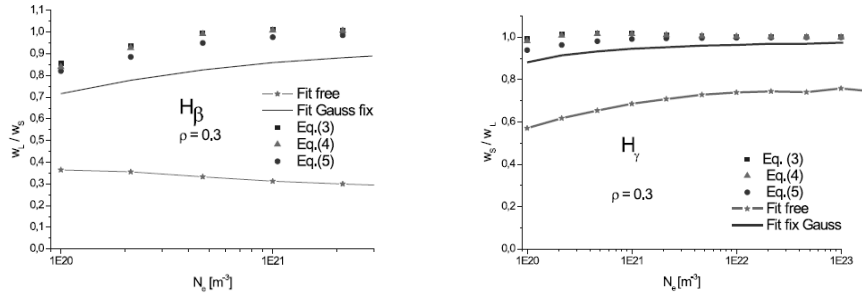


СЛИКА 1. Изглед главног менија верзије програма за одређивање N_e поређењем експерименталних и теоријских профила Балмер бета, H_β линије водоника.

При малим N_e , а посебно при малим температурама гаса и већим притисцима утицај Ван дер Валсовог (Van der Waals) ширења постаје знатан и мора се узети у разматрање. Процена полуширине и утицаја Ван дер Валсовог-овог ширења [6] детаљно је анализирано у оквиру овог предавања. Показано је и да одређивање Штарковог удела фитовањем помоћу Војт (Voigt) функције може дати и до

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

неколико пута мањих вредности полуширина (видети Сliku 2) и поред изузетно доброг слагања експерименталног и теоријског профила. Посебна пажња је посвећена и још израженијем побољшању тачности применом деконволуционих формула попут израза (3).



СЛИКА 2. Поређење различитих деконволуционих метода и тачних Штаркових полуширина за: а) H β и H γ линију водоника.

Анализа зависности полуширине линија од густине електрона по различитим теоријама показује да и поред одличног слагања у случају H β линије, постоје знатна одступања код VCS теорије у случају H α и H γ линије. Поред апроксимативних формула $N_e = f(w_s)$ зависности у случају H β линије биће приказани и изрази за остале линије. Значај линија виших чланова Балмерове серије за дијагностику ниских N_e и облици примене биће такође презентовани.

Растојање између пикова, $\Delta\lambda_{ps}$ H β линије предложено је за дијагностику при вишим вредностима N_e када и долази до њихове појаве [7]. Показано је да се применом формуле:

$$\log N_e [m^{-3}] = 22.621 + 1.452 * \log \Delta\lambda_{ps} [nm] \quad (4)$$

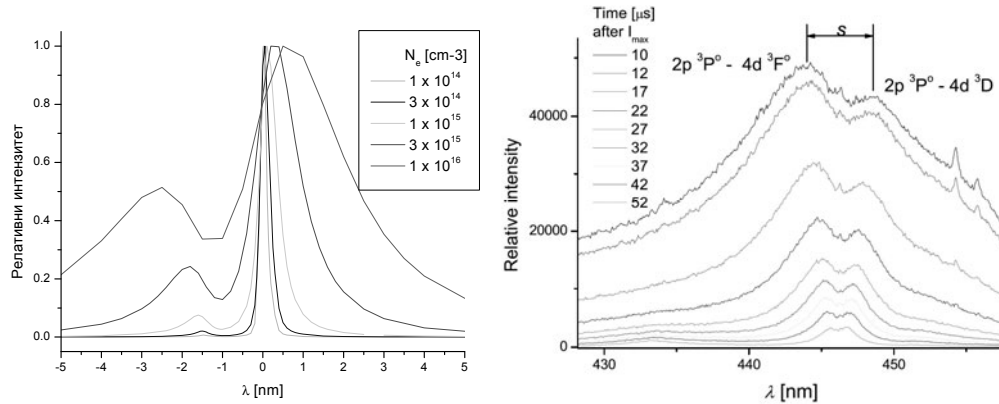
N_e може одредити са тачношћу бољом од 30 % Ова метода је мало осетљива на појаву самоапсорпције линија, а може се користити и за процену хомогености плазме.

Предности и недостаци коришћења H γ такође ће бити разматране [8].

3. ХЕЛИЈУМОВЕ ЛИНИЈЕ СА ЗАБРАЊЕНИМ КОМПОНЕНТАМА

У савременим плазма технологијама хелијум има врло значајну улогу. Када водоник није присутан у таквој плазми и његово додавање ремети услове рада дијагностика се врши анализом облика хелијумових линија. Њихова примена била је ближе разматрана у једном од претходних предавања на овом симпозијуму, па је овде посвећена пажња само линијама са забрањеним компонентама. Превасходно ће пажња бити усмерена према проучавањима линија на 447.1 и 492. 2 nm [9-12]. Карактеристични облици линије на 447.1 nm добијени на основу: а) обједињене теорије на ниским и средњим N_e и б) мерења на великим N_e приказани су на Слици 3. Може се лако закључити да се растојање између пикова s и однос интензитета забрањене, F и дозвољене A компоненте F/A знатно мењају са променом N_e .

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења



СЛИКА 3. Профили хелијумове линије са забрањеним компонентама на 447.1 nm добијени на основу: а) теоријских прорачуна применом обједињене теорије и б) експерименталним мерењима на високим N_e .

Предложено је коришћење растојања између пикова s за дијагностику N_e применом формула:

$$\log_{10}(N_e) = 21.5 + \log_{10}((s / 0.1479)^{b(T)} - 1) \quad ; \quad b(T_e) = 1.46 * 8380 / T_e \quad (5)$$

$$\log_{10}(N_e) = 21.3065 + (1/0.8766) * \log_{10}((s/0.13187)^{b(T)} - 1) \quad ; \quad b(T) = 1.25 + 994/T \quad (6)$$

за линије 447.1 и 492.2 nm респективно. Важно је истаћи да је растојање s слабо осетљиво на постојање самоапсорпције и да се може лако одредити па се на овај начин постиже знатно повећање тачности дијагностике N_e .

На крају, треба напоменути да су из резултата поменутих истраживања којима је руководио професор Никола Коњевић, произишла три прегледна рада у часопису са импакт фактором већим од 3 [2, 6, 13]. Велика цитираност поменутих радова говори и да су описане дијагностичке методе дијагностике постале врло значајне и широко примењиване за дијагностику густина електрона у плазми.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ивковић М. Докторска дисертација, Електротехнички факултет Београд, 2005.
- [2] Ivković M., Jovičević, S., Konjević N, *Spectrochim. Acta B*: **59**, 561- 605 (2004).
- [3] Ivković M., Konjević N., *J.Res.Phys.* **28**, 239-42 (1999).
- [4] Jovičević, S., Ivković, M., Pavlović, Z., and Konjević, N., *Spectrochim. Acta B*: **55**, 1879-1893 (2000).
- [5] Zikić R., Gigosos M.A, Ivković M., Gonzalez M.A, Konjević N., *Spectrochim. Acta B* **57**, 987-998 (2002)
- [6] Konjević N., Ivković M., Sakan N., *Spectrochim. Acta B* **76**, 16–26 (2012).
- [7] Ivković M., Konjević H., Pavlović S., *JQSRT* **154**, 1–8 (2015).
- [8] Mijatović Z., Nikolić D., Kobilarov R., M.Ivković, *JQSRT* **111**, 990 - 996, (2010).
- [9] Uzelac N.I., Stefanović I., Konjević N., *Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer* **46**, 447-53 (1991).
- [10] Ivković M., Gonzalez M. A., Jovičević S., Gigosos M. A., Konjević N., *Spectrochimica Acta Part B*: **65**, 234 - 240 (2010)
- [11] Gonzalez M.A, Ivković M., Gigosos M.A., Jovičević S., Lara N. , Konjević N., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 194010 (7pp) (2011)
- [12] Ivković M., Gonzalez M. A., Lara N., Gigosos M. A., Konjević N., *JQSRT* **127** (2013) p.82-89
- [13] Konjević N., Ivković M., Jovičević S., *Spectrochimica Acta Part B*: **65**, 593- 602 (2010).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА И ТЕОРИЈСКА ПРОУЧАВАЊА ШТАРКОВОГ ЕФЕКТА У ГАСНИМ ПРАЖЊЕЊИМА

М.М.Кураица

*Универзитет у Београду, Физички факултет, Студентски трг 12, 11000
Београд
e-mail: kuki@ff.bg.ac.rs*

1. УВОД

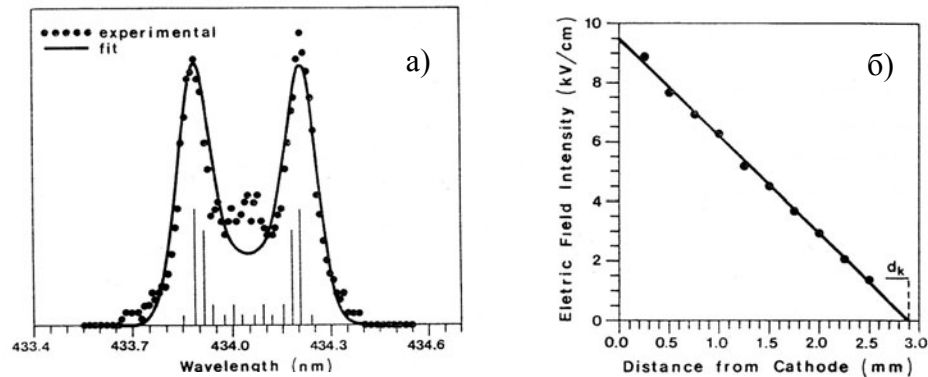
У Лабораторији за Квантну оптику Физичког факултета у Београду 90-тих година прошлог века, под руководством проф. Н. Коњевића, започета су систематска спектроскопска истраживања у извору плазме Гримовог типа [1]. До тада је овај извор углавном коришћен у аналитичкој спектроскопији, пре свега због веома ефикасног распршивања материјала катоде и ефикасне ексцитације анализата. Први спектри снимљени у нашој лабораторији показали су необична својства Балмерових линија водоника, H_{α} , H_{β} и H_{γ} , до тада непримећена у Гримовом пражњењу. На пример на профилу линије H_{β} се јасно издваја централни део нормалне ширине (нешто веће од инструменталног профила) и веома изражена необично широка крила. После извршеног абеловања, постало је јасно да никаквих нехомогености у пражњењу нема и да су широка, аномално проширена крила, последица Доплеровог ефекта. На основу полуширине ових крила процењена је средња енергија атома водоника на 100-300eV, а из централног дела линије H_{β} процењена електронска концентрација на око 10^{14}cm^{-3} . Помоћу Болцмановог графика (расподеле) одређена је електронска температура 0.3-0.5eV, а помоћу Фабри-Перо интерферометра и гасна температура 300-900K [1]. Ова мерења су касније послужила за нумеричко моделовање пражњења Гримовог типа [1] и представљају централни део магистарске тезе аутора овог текста.

2. ЗАСНИВАЊЕ МЕТОДА ЗА МЕРЕЊЕ ЈАЧИНЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ ПОЉА

На срећу, наш извор пражњења Гримовог типа има уздужни прорез у аноди и то све до саме површине катоде [1]. На тај начин омогућава латерална посматрања (нормално на осу пражњења) и мерење аксијалне расподеле параметара пражњења идући од области негативног светљења па до саме површине катоде. При првом покушају систематског снимања аксијалне расподеле профила линије H_{β} , приближавајући се површини катоде уочено је

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

нагло ширење па чак и цепање њеног централног дела. Профил је почео да подсећа на H_{β} -у плазми при високим електронским концентрацијама, са јасно израженим минимумом у средини. После тог запажања постало је јасно да до цепања линије H_{β} долази услед статичког Штарковог ефекта у јаком електричном пољу близу површине катоде. Знајући да растојање између карактеристичних максимума на профилу линије расте линеарно са јачином електричног поља (линеарни Штарков ефекат код атома водоника!) Сл.1а, лако се може реконструисати просторна расподела електричног поља у области катодног пада потенцијала, Сл.1б [2].



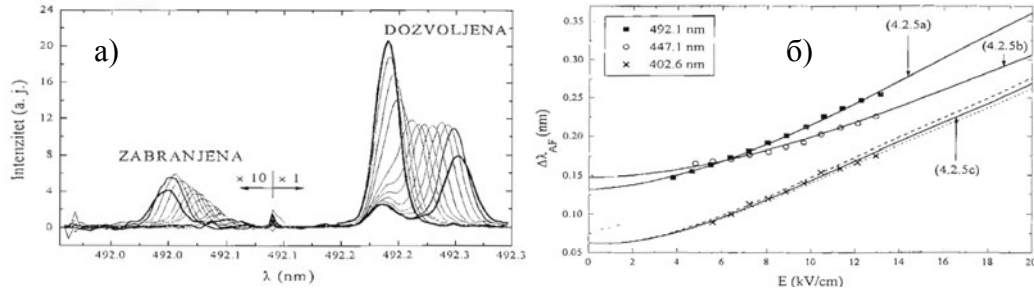
СЛИКА 1. Карактеристичан профил линије H_{β} у прикатодној области а) и аксијална расподела електричног поља у прикатодној области добијена помоћу тих профила б)

На овај начин је успостављен једноставан, непертурбативни, спектроскопски метод за мерење јачине статичког електричног поља у пражњењима са водоником или додатком водоника. Касније је уследила детаљнија разрада овог метода и његова примена за тестирање теорија катодног пада потенцијала [3].

Трећи важан ефекат који је такође уочен у прикатодној области Гримовог пражњења је појава забрањених линија у спектру пражњења са хелијумом. Наиме, при посматрању пражњења са стране, латерално, приближавајући се површини катоде, појављују се неке линије у спектру које се не виде у негативном светљењу, постају све интензивније и померају се ка плавој области Сл.2 а). Оне интензивне линије које се виде и у негативном светљењу постају све слабије и померају се ка црвеном дела спектра [4]. Лако је закључити да је опет у питању Штарков ефекат али сада код атома He, где у јаком електричном пољу долази до нарушавања селекционих правила и појаве забрањених прелаза (линија) као и до цепања и помераја енергетских нивоа. Када се јачина електричног поља у прикатодној области пражњења у мешавини He и H_2 одреди независно, помоћу профила линије $H_{\beta}(\pi)$ (на напред описан начин) и на истим позицијама у катодном паду сниме спектри у околини линија HeI $\lambda=402,6\text{nm}$,

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

447,1nm и 492,1 nm, а затим нацрта график зависности растојања између максимума дозвољених и забрањених компоненти од јачине измереног електричног поља, добијају се експерименталне тачке представљене на графику на Сл.2 б.) [4].



СЛИКА 2. Померај забрањене и дозвољене компоненте линије 492,1nm HeI у области катодног пада потенцијала а) и график зависности растојања између масимума дозвољених и забрањених компоненти линија He од јачине електричног поља б)

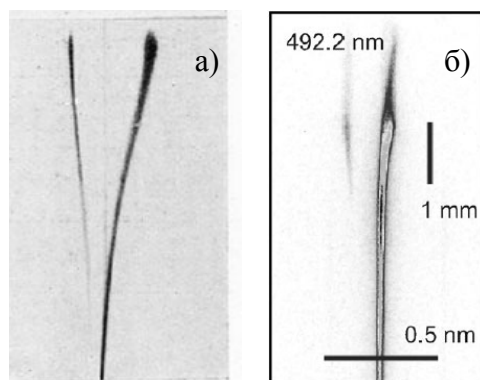
Ово је у ствари калибрациони график, при чему одмах пада у очи да померај енергетских нивоа (и растојања између максимума дозвољене и забрањене компоненте) при малим вредностима поља зависи од квадрата јачине електричног поља али да изнад 6 kV/cm прераста недвосмислено у линеаран Штарков ефекат. Квадратна зависност је очекивана код He и може се лако објаснити [5], али линеарни Штарков ефекат код атома He је у први мах деловао збуњујуће.

Објашњење је пронађено у референци из периода заснивања квантне механике и пертурбационе теорије, 1927 године [6], у којој су приказани снимци цепања линија He у јаком електричном пољу, које је Ло Сурдо (Lo Surdo) забележио на фотоплочама. Са ових снимака се недвосмислено види да је Штарков ефекат код He линеаран, Сл.3 а.). Само теоријско објашњење (у то време је представљало прву примену пертурбационе теорије на основу Хајзенбергове сугестије) са данашњег становишта изгледа готово тривијално. Наиме, ако се има у виду да један од два хелијумова електрона увек остаје у основном 1s стању (јер би у супротном дошло до аутојонизације) и да због сферносиметричне расподеле екранира језгро, онда се онај други (екситовани) електрон креће у ефективном Кулоновом пољу једног протона, потпуно идентично као у атому водоника! На тај начин се пертурбациони проблем дејства екстерног електричног поља своди на исти проблем као код атома водоника, односно, захтева примену пертурбационе теорије дегенерисаних нивоа [6]. Јасно је да ће у том случају и Штарков ефекат бити линеаран. Када се коначно јачина електричног поља узме као параметар у пертурбационом рачуну а затим у корацима од 1 kV/cm израчуна померај одговарајућих нивоа He и унесе на график на Сл.2б.), добија се

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

непрекидна линија. Иако је уочити да је слагање експерименталних и теоријски добијених резултата изврсно и да се на тај начин добија добро заснована метода за употребу растојања између дозвољених и одговарајућих забрањених линија за мерење јачине електричног поља. Ова истраживања представљају кључни део докторске дисертације коју је аутор радио под руководством проф. Н.Коњевића.

У референци [7] метод је ажуриран и прилагођен за лакшу употребу, а посебан куриозитет представљају снимци приказани у истој референци добијени iCCD камером, (Сл.3б.), који показују невероватну сличност са оригиналним Ло Сурдовим снимцима на фото-плочама, (Сл.3 а.). Иако је добро заснована на јасној квантномеханичкој теорији, експериментално независно проверена помоћу профила линије H_{β} и за примену не постоје ограничења која нпр. траже специфичне услове ексцитације у пражњењу, предложени метод за мерење јачине статичког електричног поља у пражњењима дуго времена је остао незапажен. Ренесансу је доживео применом у ДБП пражњењима за праћење динамике њиховог просторно временског развоја [8] а применом овог метода за дијагностику плазма млаза у моду плазма метка први пут је експериментално установљен минимум поља на оси пражњења [9].



СЛИКА 3. Штарково цепање линије 492,1nm HeI регистровано на Ло Сурдовим фото плочама а) и најмодернијом техником, iCCD камером, у Гримовом пражњењу б)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kuraica M, Konjević N, Platiša M and Pantelić D *Spectrochimica Acta Part B* **47** 1173 (1992)
- [2] Kuraica M., Videnović I. and Konjević N, *Contributed papers of 17th SPIG* (1994), Belgrade p216
- [3] Videnović I R, Konjević N and Kuraica M M *Spectrochim. Acta Part B* **51** 1707 (1996)
- [4] Kuraica M M and Konjević N, *Appl. Phys. Lett.* **70** 1521 (1997)
- [5] Unsold A., *Ann. d. Phys.* **82** 355 (1927)
- [6] Foster J S *Proc. R. Soc. London Ser. A* **117** 137 (1927)
- [7] Cvetanović N, Martinović M.M., Obradović B M, , Kuraica M M, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 205201 (2015)
- [8] Ivković S S, Obradović B M, Cvetanović N, Kuraica M M and Purić J, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 225206 (2009)
- [9] Sretenović G B, Krstić I B, Kovačević V V, Obradović B M, Kuraica M M *Appl. Phys. Lett.* **99** 161502 (2011)

КИНЕТИЧКИ ИТЕРАТИВНИ МОДЕЛ ПРОУЧАВАЊА ГАСНИХ ПРАЖЊЕЊА

Ђорђе Б. Спасојевић

*Универзитет у Београду – Физички факултет,
Студентски трг 12, 11000 Београд, Србија
e-mail: djordjes@ff.bg.ac.rs*

1. УВОД

Изучавање колизионих и транспортних процеса у прикатодној области је један од фокуса истраживања у савременој физици гасних пражњења. Иако је данас предложено више модела (видети нпр. ревијални рад [1] као и [2]), ови модели још увек не дају пуни квантитавин опис неких од експерименталних резултата. Посебно важан пример су ексцесивно проширена крила спектралних линија јер се њиховом анализом могу одредити најрелевантнији параметри пражњења.

На Универзитету у Београду – Физичком факултету је формиран један итеративни кинетички модел прикатодне области у абнормалном и микро тињавом пражњењу у чистом водонику и инертним гасовима са примесама водоника. Модел омогућава ефикасан прорачун дистрибуције електричног поља и функција расподеле релевантних типова атома и јона и на основу њих готово свих спектроскопских величина од интереса. Истраживања је иницирао, а затим њима руководио Проф. др Никола Коњевић дајући својим сталним и активним радом низ фундаменталних доприноса без којих модел не би био могућ.

2. ТЕОРИЈСКИ МОДЕЛ

Квалитативан опис модела прикатодне области је следећи: кроз матрицу хладних честица носећег гаса (атоми инертног гаса, односно молекули водоника) се крећу електрони и јони гаса које убрзава електрично поље у прикатодној области (КО). Ови јони настају у КО (доминантно електронским и јонским ударом) или продиру из области негативног светљења (НС). Посебно су значајни позитивни јони који се убрзавају ка катоди и на том путу сударају. Доминантни су судари са честицама носећег гаса, где се поред еластичних јавља више типова неластичних судара, од којих су најзначајнији измена наелектрисања, дисоцијација и распад јона. Јони пристигли на катоду се неутрализују (вишеатомски јони се распадају на атоме), те се од катоде рефлектују брзи атоми. Ови брзи атоми се ексцитују у сударима са честицама носећег гаса и њиховим зрачењем у електричном пољу се добијају ексцесивно проширена крила спектралних линија.

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

Теоријски се КО може описати самоусаглашеним системом стационарних једначина:

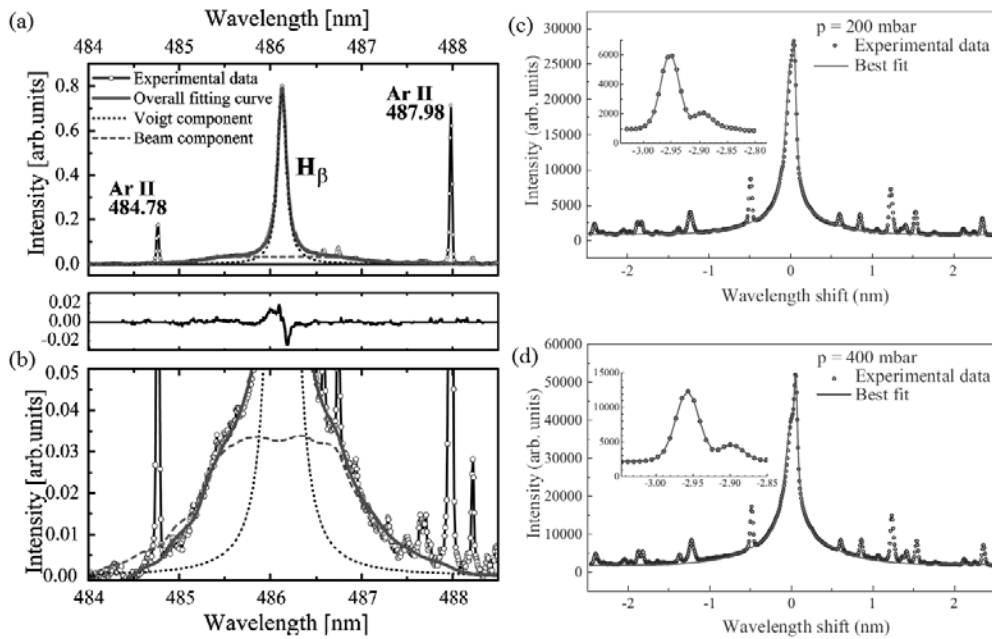
$$\vec{v} \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{r}} + \frac{q_k \vec{E}}{m_k} \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{v}} = I_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{\alpha} q_{\alpha} \int f_{\alpha} d^3 \vec{v}, \quad (2)$$

где је (1) систем кинетичких једначина за функције расподеле $f_k(\vec{r}, \vec{v})$ свих релевантних типова честица (m_k је маса, q_k - наелектрисање и I_k - колизииони интеграл честица типа k), док је у једначини (2) за електрично поље $\vec{E}(\vec{r})$ запреминска густина наелектрисања $\rho(\vec{r}) = \sum_k q_k \int f_k(\vec{r}, \vec{v}) d^3 \vec{v}$. Ефикасни пресеци за електронске сударе су узимани из [3], а за тешке честице из [4].

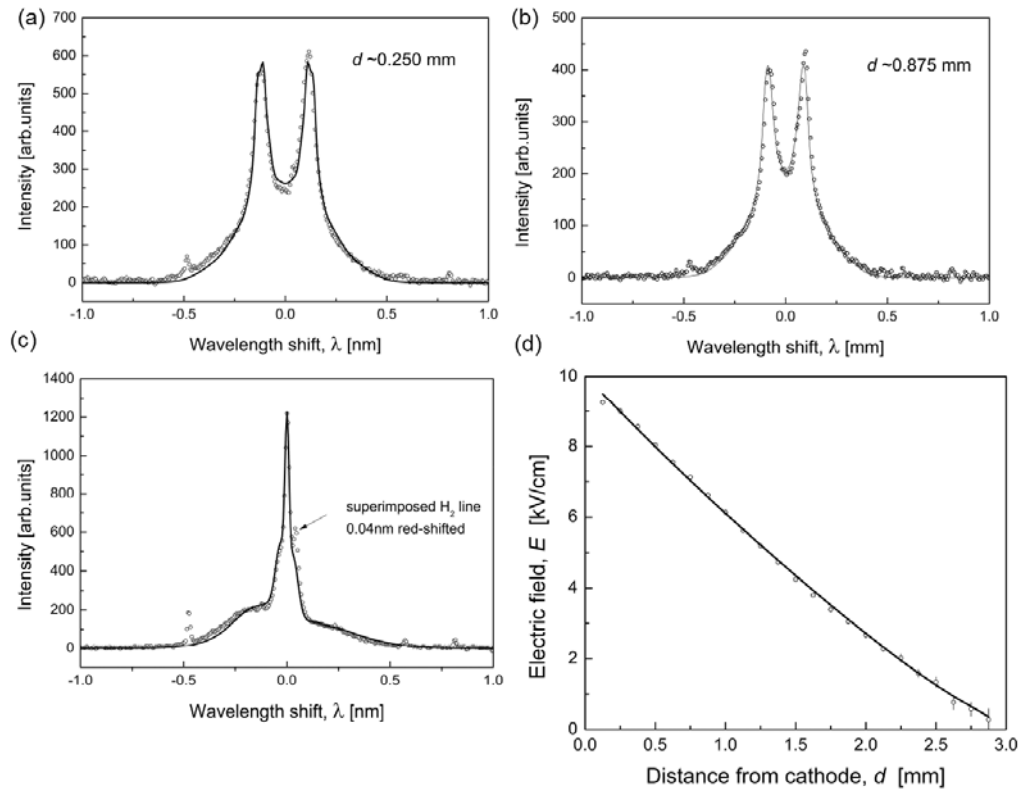
Систем једначина за јоне се може распрегнути од једначине за електроне уколико се у њиховим колизиионим интегралима допринос судара са електронима апроксимира помоћу густине струје електрона и ефективног пресека за сударе. Последица распрезања је да се може добити итеративни систем једначина који се ефикасно решава идући од границе НС ка катоди. Дистрибуција брзих атома рефлектованих од катодe се добија из јонских расподела на катоди и услова рефлексије на њој [5].

На сликама (1-3) дати су снимљени профили водоничних линија и одговарајуће предикције модела.

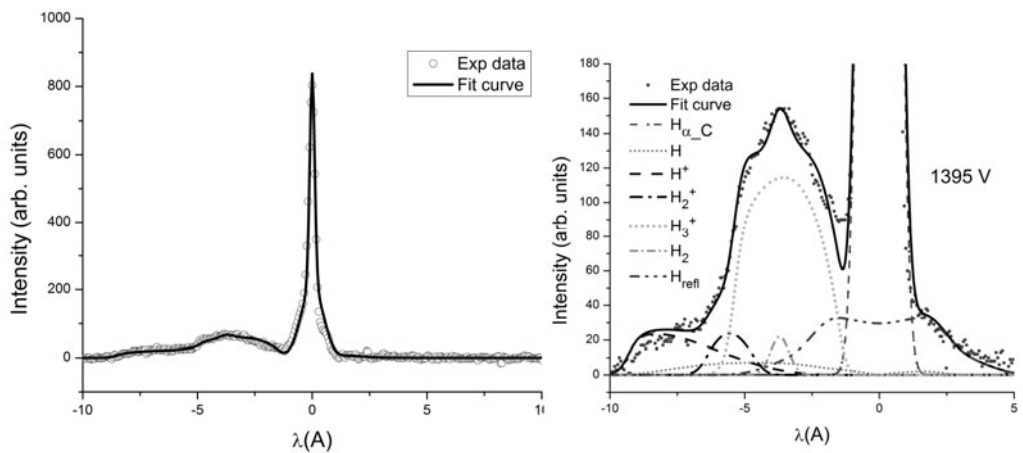


СЛИКА 1 Неполаризовани end-on профили водоничне линије H_{β} у тињавом микропражњењу на атмосферском притиску у аргону са примесама H_2 , (a) и (b), и чистом H_2 (c) и (d).

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења



СЛИКА. 2 Профили водоничне линије H_β у абнормалном тињавом у чистом водонику на притиску 4 mbar: π -поларизовани снимљени side-on, (a) и (b), и неполаризовани end-on (c). (d) је дистрибуција електричног поља.



СЛИКА 3 Лево: Неполаризовани end-on профил водоничне линије H_α у високонапонском абнормалном тињавом у чистом водонику на притиску 0.43 mbar. Десно: допринос различитих дистрибуција крилима линије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Phelps A V 2009 Phys. Rev. E 79 066401
- [2] Petrović Z., Jelenković B, and Phelps A. 1992 Phys. Rev. Lett. 68, 325
- [3] Tawara H, Itikawa Y, Nishimura H and Yoshino M 1990 J. Phys. Chem. Ref. Data 19 617
- [4] Tabata T and Shirai T 2000 At. Data Nucl. Data Tables 75 1
- [5] SRIM-2008, Ziegler J F, Ziegler M D and Biersack J P (www.SRIM.org)
- [6] Spasojević Dj, Cvejić M, Šišović N M and Konjević N 2010 Appl. Phys. Lett. 96 241501
- [7] Cvejić M, Spasojević Dj, Šišović N M and Konjević N 2011 J. Appl. Phys. 110 033305
- [8] Spasojević Dj, Cvejić M, Šišović N M and Konjević N 2012 J. Appl. Phys. 111 096103
- [9] Spasojević Dj, Stefleková V, Šišović N M and Konjević N 2012 Plasma Sources Sci. Technol. 21 025006
- [10] Spasojević Dj, Stefleková V, Šišović N M and Konjević N 2014 Plasma Sources Sci. Technol. 23 012004
- [11] Spasojević Dj, Mijin S, Šišović N M and Konjević N 2012 submitted to Plasma Sources Sci. Technol.

УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

У оквиру овог симпозијума од стране најближих сарадника Николе Коњевића презентовани су најважнији резултати из истраживања којима је он руководио. Ова прича међутим не би била комплетна без увида у истраживања које је он изводио самостално или уз сарадњу само са страним коауторима. Немогућност да у оквиру овог симпозијума своје виђење научног доприноса Никола Коњевића изнесе нпр. Волфганг Визе (Wolfgang Wiese) бивши директор Националног Института за Стандарде и Технологију из Вашингтона, САД наметнула је да као организатори овог симпозијума кажемо нешто и непоменути, а можда и најзначајнијим истраживањима професора Николе Коњевића. У овом прегледу даћемо само кратки осврт на резултате његових истраживања из: а) области ласерске интерферометрије [1-3] и б) области проучавања Штаркових параметара неводоничних атома и јона из којих су проистекле критичке евалуације [4 - 9] и монографија [10].

Већ првих година по открићу гасних ласера професор Коњевић је радио на њиховој примени за дијагностику густине електрона у електричном луку. Промена индекса преламања услед присуства одређене густине електрона доводила је до промене оптичког пута у једној грани итерферометра и стварања интерференционих пруга. Бројањем интерференционих пруга, f уз познавање дужине плазме, L могуће је одредити промену N_e преко релације:

$$\Delta N_e = \frac{f}{4.49 \cdot 10^{-14} 2 L \lambda}$$

Овај метод примењивали су за независно одређивање N_e у својим истраживањима проф. Р. Кобиларов и др. М. Ивковић, а тренутно на унапређењу ове технике ради и проф. Сакан.

Сазнања из области физике и технике ласера током рада на овој тематици биле су покретач развоја ласера у нашој земљи, увођења првог курса и уџбеника [11], као и бројних пројеката под руководством проф. Коњевића (о чему је више информација приказано у предавању др. Јовићевић).

Деценије рада на експерименталном одређивању параметара Штарковог ширења и померања спектралних линија у плазми

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K.R.Hearne and N.Konjević, Laser interferometric measurements of electron density in an arc plasma, Z.Phys. 204, 443-55 (1967).
- [2] N.Konjević and K.R.Hearne, Measurements of arc electron densities using a CO₂ laser, Phys.Lett 28A, 309-10 (1968).

Дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења

- [3] N.Konjević, A laser interferometric study of argon arc plasmas, PhD Thesis, Electrical Engineering Department, University of Liverpool, Liverpool (1968).
- [4] N.Konjević and J.R.Roberts, A critical review of the Stark widths and shifts of spectral lines from non-hydrogenic atoms, J.Phys.Chem.Ref.Data 5, 209-57 (1976).
- [5] N.Konjević and W.L.Wiese, Experimental Stark widths and shifts for non-hydrogenic spectral lines of ionized atoms (a critical review and tabulation of selected data), J.Phys.Chem.Ref.Data 5, 259-308 (1976).
- [6] N.Konjević, M.S.Dimitrijević and W.L.Wiese, Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral atoms (a critical review of selected data for the period 1976 to 1982), J.Phys.Chem.Ref.Data 13, 619-47 (1984).
- [7] N.Konjević, M.S.Dimitrijević and W.L.Wiese, Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of positive ions (a critical review and tabulation of selected data for the period 1976 to 1982), J.Phys. Chem. Ref.Data 13, 649-86 (1984).
- [8] N.Konjević and W.L.Wiese, Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms (a critical review of selected data for period 1983 through 1988), J.Phys.Chem.Ref.Data 19, 1307-85 (1990).
- [9] N.Konjević, A.Lesage, J.R.Fuhr and W.L.Wiese, Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms (a critical review of selected data for period 1989 through 2000), J.Phys. Chem.Ref.Data 31, 819-927 (2002).
- [10] N.Konjević, Plasma broadening and shifting of non-hydrogenic spectral lines: Recent status and applications, Physics Reports 316, No.6, 339-401 (1999).
- [11] N.Konjević, Uvod u kvantnu elektroniku-laseri, Naučna knjiga, Beograd (1981).

