

ТРИБИНА БИБЛИОТЕКЕ САНУ

ГОДИНА V

БРОЈ 5

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

THE SASA LIBRARY FORUM

YEAR V

VOLUME 5

Accepted on December 27th 2016, at the 10th meeting of the SASA Department of
Language and Literature, following the reviews of academician
Nada Milošević-Dorđević and academician *Predrag Piper*

Editor-in-chief
academician
MIRO VUKSANOVIĆ

BELGRADE
2017

ISSN 2335-0121

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ТРИБИНА БИБЛИОТЕКЕ САНУ

ГОДИНА V

БРОЈ 5

Примљено на X скупу Одељења језика и књижевности
од 27. децембра 2016. године, на основу рецензија академика
Насе Милошевић-Ђорђевић и академика *Предрага Пићера*

Уредник
академик
МИРО ВУКСАНОВИЋ

БЕОГРАД
2017

© Српска академија наука и уметности, 2017

Трибина Библиотеке САНУ основана је да приказује јавности нове књиге чланова САНУ, нова издања САНУ и њених института, из свих области наука и уметности. Први уредник Трибине био је академик Никша Стипчевић, управник Библиотеке САНУ од 1991. до 2011. године. Од октобра 2011. године уредник Трибине је академик Миро Вуксановић, управник Библиотеке САНУ.

Годишњак *Трибина Библиотеке САНУ* покренут је 2013. године. У првом броју донет је целовит преглед приказаних књига у Салону САНУ од 1991. до јуна 2011. године, а потом, у хронолошком низу, текстови казани на Трибини од новембра 2011. до краја 2012. године. У другом броју штампани су текстови са Трибине из 2013. године. У трећем броју објављени су текстови са Трибине из 2014. године. У четвртном броју су текстови са Трибине из 2015. године.

Прилози се објављују без измена. Дати су наслови где их није било на саопштењима.

ТРИБИНА БИБЛИОТЕКЕ САНУ
19. I 2016 – 13. XII 2016.

Уредник
академик Миро Вуксановић

Стручни сарадник
Стасја Церовић

САДРЖАЈ

<i>Plasma electronics : applications in microelectronic device fabrication / Toshiaki Makabe, Zoran Lj. Petrović</i>	11
<i>ΠΕΡΙΒΟΛΟΣ. Књ. 1–2, Зборник у часопису Мирјане Живојиновић / уредници Бојан Миљковић, Дејан Целебујић</i>	29
<i>Сенџандрејски зборник. [Књ. 1–4] / уредници Дејан Медаковић, Динко Давидов</i>	41
<i>Дејинињсџиво / Динко Давидов</i>	41
<i>Научно наслеђе Радомира Д. Лукића : зборник радова са научној скупи одржаној 11–12. децембра 2014. / уредници Данило Басија, Сима Аврамовић</i>	51
<i>Фази линџисџика / Милорад Радовановић</i>	65
<i>Најџисџи исџоријске садржине у зидном сликарсџиву. Том 1, XII–XIII век / Гојко Субојић, Бојан Миљковић, Ирена Шџадијер, Ида Тоџи</i>	81
<i>Моћ и џревласџи : Тукидидова џолиџичка мисао / Косџија Чавошки</i>	93
<i>Оџашевџић / [џексџиови] Ирина Субојић, Бранислав Димџиријевић, Јован Чекић</i>	105
<i>Три џоеме / Маџија Бећковић</i>	119

Дан Библиоџеке САНУ џосвећен Вуку Сџефановићу Караџићу	137
Вук Сџефановић Караџић : (1787–1864–2014) / уредник Нага Милошевић-Ђорђевић	137
Свети Гирило и Методије и словенско џисано наслеђе : 863-2013 / [уредници Јованка Радић, Викџор Савић]	157
Образовање : развојни џојенџијал Србије : зборник радова са научној скуџа одржаној 23. и 24. новембра 2012. џодине / уредник Александар Косџић	169
Двесџа џодина од рођења Јосифа Панчића / уредник Владимир Сџевановић	183
Флора бриофџија Србије. [Књ.] 1, Тресетџнице (Sphagnophyta) / Марко Сабовљевић ; уредник Владимир Сџевановић	183
Ономасџика ценџралној Косова / Милетџа Букумирић ; џлавни уредник Александар Лома	207
Ономаџолошки џрилози. [Књ.] 22 / џлавни уредник Александар Лома	207
Први балкански рајџ 1912–1913 : исџоријски џроцеси и џроблеми у светџлосџи сџоџодинишњеј искусџва / уредник Михаило Војводић	225
Глас Одељења исџоријских наука САНУ (џосвећен академику Владимиру Сџојанчевићу) / уредник Љубомир Максимовић	225
Зборник радова у часџ академику Десанки Ковачевић Којић / џлавни уредник Рајко Кузмановић	240
Докџор Владан Ђорђевић : џедесетџодинишња књижевноја рада : 1860 – 25. фебруар – 1910 / Војислав М. Субоџић	252
Прилози за исџорију хемаџологије у Србији / Радоје Чоловић, Милица Чоловић, Наџаша Чоловић	252

<i>На крају њуџа / Дејан Десџић ; уредник Милан Лојаница</i>	<i>273</i>
<i>Унајређење села у брдско-џланинским џодручјима Србије / уредник Драјан Шкорић</i>	<i>291</i>
<i>Унајређење џчеларсџива у Србији / уредник Драјан Шкорић</i>	<i>291</i>
<i>Образовање за модерну џољџивреду : зборник радова са научној скуђа, Шабац, 27. мај 2016. Година / уредник Драјан Шкорић</i>	<i>291</i>
<i>Академске беседе. Књ. 1 / уредник Миро Вуксановић</i>	<i>310</i>
<i>Прејиска Лодовика Бекаделија, надбискуђа дубровачкој (1555–1560) / Снежана Милинковић, Никша Сџићчевић ; уредник Слободан Грубачић</i>	<i>315</i>
<i>Зборник Инсџијџуђа за срџски језик САНУ. [Књ.] 3, Срџски језик и акџуелна џиђања језичкој џланирања / уређивачки одбор Иван Клајн, Предрај Пџиер, Срејџо Танасић ; џлавни уредник Срејџо Танасић</i>	<i>329</i>
<i>Именик ауђџора, уредника и џоворника</i>	<i>352</i>

Plasma electronics : applications in microelectronic device fabrication
/ Toshiaki Makabe, Zoran Lj. Petrović. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press,
Taylor & Francis, 2015

Поздравна реч: академик Владимир С. Костић, председник САНУ
Говорили: академик Нинослав Стојадиновић
академик Зоран Љ. Петровић
др Саша Дујко

У Београду, уторак 19. јануар 2016. у 13 часова

НА ПОЧЕТКУ

У овој прилици, као и раније, са чашћу и задовољством отварам прву Трибину Библиотеке САНУ у 2016. Поздрављам часнике, чланове и госте Академије.

Поновићу основне податке које смо саопштили пре непун месец, сада већ прошле године, у којој је, на 22 трибине, седамдесет академика и професора универзитета приказало 134 књиге и научна зборника. Њихова саопштења су окупљена у годишњаку Трибине, четвртом у низу, а првој књизи која је изашла на почетку 175. године од оснивања Друштва српске словесности, како се САНУ на почетку звала. Годишњак Трибине има 304 странице. Текстови на њима сведоче да је Академија делатна установа која је у прошлој години завршила, наставила и започела капиталне пројекте у својим одељењима, одборима и институтима.

О пословима у великом систему САНУ мало се говори и још мање у јавности зна. Није лако ширити вести о успеху. Лако се при-

мају предрасуде и зависти. Зато је потребно понављати и оно што је познато. Истина не застарева.

Прва реч, на почетку јубиларне године и на првој Трибини у 2016, по природном реду, припада академику Владимиру С. Костићу, председнику САНУ, а потом ћемо приказати књигу академика Зорана Љ. Петровића, секретара Одељења техничких наука и управника Галерије науке и технике. Говориће академик Нинослав Стојадиновић и др Саша Дујко.

(Реч уредника Трибине)

М. В.

ВЛАДИМИР С. КОСТИЋ

ПОЗДРАВНА РЕЧ

Првом Трибином Библиотеке САНУ у 2016. години, придружујемо се још једном путовању кроз стваралаштво наших чланова и њихових сарадника, путовању на које су нас неки вредни и предани људи сада већ свикли, па и без свести зашто, по условном рефлексу, само овог пута не Павлова него Вуксановића и сарадника, уторком у 13 сати ништа друго не заказујемо, чак ни оних уторака када се Трибина и не одржава.

Организатори ове Трибине нас, особе кратких узлета и дуготрајних напора, уз то и провоцирају хистрионски приказујући плодове своје постојаности и упорности. Питате се где су ми докази. Ја у рукама држим четврти број *Трибине Библиотеке САНУ*, чији је уредник академик Миро Вуксановић, за који су рецензије написали академик Нада Милошевић-Ђорђевић и академик Предраг Пипер. То је заправо један калеидоскоп двадесет два догађаја, рекао бих догађаја књига, мада се у неким случајевима, као код академика Душана Ковачевића, радило и о сабраној драми у дугом временском периоду, који су се одржавали у овој сали од 20. јануара до 22. децембра 2015. године. Ти прикази или тај калеидоскоп нам омогућава да у иначе скученој свакодневици путујемо различитим просторима и временима, упознамо неке друге људе којих одавно нема и једноставно постајемо боље обавештени то јест, да злоупотребим сопствено искуство, и паметнији. У цивилизацији видео-надзора и прислушкивања, нашим ауторима и ствараоцима ове Трибине Библиотеке Српске академије наука и уметности нема узмака, они су сви у овој књизи пописани, њих шездесет

и пет. Са овом књигом је већ процес праћења и денунцијације у 2015. години знатно лакши, а олакшан је и чињеницом да су поједини учесници, попут академика Зорана Петровића, заправо, да употребим робијашки речник, рецидивци и упорни повратници на овим трибинама. У овом деликатном моменту Српске академије наука и уметности, у сенци неспоразума у дијалогу природних и друштвено-хуманистичких наука, али и науке и уметности уопште, добро је што 2016. годину започињемо једним ортодоксним научним делом чији је један од два аутора, у иначе међународној монографији, и наш Зоран Петровић. Можда је управо једна од улога Трибине Библиотеке САНУ да нас убеди да је, без обзира на природе науке и уметности, у стваралаштву много више тога што је заједничко него посебно, и прометејског зноја и луциферских искушења, и да то једни код других морамо да научимо да поштујемо чак и када се не разумемо у потпуности.

На крају, дозволите ми да укажем да је година коју данас започињемо 175. у редоследу једне идеје, то је уосталом назначено на позивници коју сте добили и коју ћете ове године добијати, и да данас нехотице започињемо годину дана дугу прославу. Слављеници могу да буду, наравно, само аутори и ствараоци, ја им стога овог тренутка уступаам место.

Зоран Љ. Петровић

НЕРАВНОТЕЖА КАО ОСНОВНА ИДЕЈА САВРЕМЕНЕ
НАУКЕ И НАЈАКТУЕЛНИЈИХ ПРИМЕНА: КАКО ЈЕ ФИЗИКА
ПЛАЗМЕ ДОПРИНЕЛА РАЗВОЈУ ТЕХНОЛОГИЈЕ
ЗА ПРОИЗВОДЊУ ИНТЕГРИСАНИХ КОЛА

Неравнотежа као основни принцип

У вишедеценијској дебати око тога ко је заиста изумео интегрисана кола, улога Роберта Нојса (Robert Noyce) и целог тима у Ферчајлд (Fairchild) компанији (из које је касније настао Интел (INTEL)) умањивана је уз навођење речи самога Нојса да му циљ није била интеграција већ решавање производног проблема. С друге стране, конструкција (од једног транзистора и једног отпорника) коју је на комаду германијума начинио наводни проналазач интегрисаних кола Џек Килби (Jack Kilby), са спољашњим жицама које повезују елементе, нити се може масовно производити нити је истински интегрисана. Суштина интегрисаних кола јесте у масовној производњи. Дакле, управо су ре-

шавања производних проблема давала целом пројекту смисао и водила га даље. То не значи да у решавању тих проблема није било науке. Напротив, било је и те како много фундаменталног научног рада, али он се обављао у домену развоја производне технологије, пре свега плазма нагризања, али и фотолитографије.

Хосокава (N. Hosokawa) са сарадницима је 1974. године дошао до сазнања да нагризање применом неравнотежне плазме даје веома анизотропно нагризање какво је било потребно у производњи интегрисаних кола¹. Ово је објашњено експериментално од стране Кобурна и Винтера (J. W. Coburn и H. F. Winters) увођењем идеје о реактивном нагризању јонским снопом и синергизму између адсорбованих радикала и јона велике енергије који бомбардују површину силицијума².

Управо су три особине неравнотежне плазме омогућиле анизотропно нагризање и самим тим и развој микроелектронике од почетка 70-их до данас, дакле, од две хиљаде до две милијарде транзистора по интегрисаном колу.

Прва особина је да су раздвојене кинетике електрона и тешких честица (јона и неутрала) самом чињеницом да су електрони знатно лакши и одржавањем ниског степена јонизације. Резултат тога је да су температуре електрона високе, опсег им је и до више стотина хиљада степени Целзијуса (ако се уопште овде може говорити о температури). Енергијом електрона се производи и одржава плазма. У исто време су температуре тешких честица блиске собној температури. Дакле, у самој плазми енергија јона је око 38 meV, док је средња енергија електрона бар сто пута већа.

Друга особина неравнотежних плазми је да се оне бране од сопственог нестајања тако што спречавају бежање брзих електрона из плазме. Како прва група електрона доспе до површине електрода, тако се формирају приелектродни слојеви (sheath) у којима јако поље спречава даљи губитак електрона. Овим се (са тачке гледишта негативних електрона) сама плазма налази у дну потенцијалне јаме, а са тачке гледишта јона налази се на врху изразите висоравни електричног потенцијала. Доласком у граничну зону електрони се коче, а јони се убрзавају (док флуks позитивних и негативних честица на зидове не постане изједначен а губици компензовани производњом нових). Како је почетна енергија јона мала, а убрзање које добијају је под правим углом на површину електрода, то јони падају под правим углом и обезбеђују нагризање само на дну структуре а не и на њеним бочним

¹ N. Hosokawa, R. Matsuzaki, and T. Asamaki. "Proceedings of the 6th International Vacuum Congress", *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl.* 2, 435 (1974).

² J. W. Coburn and H. F. Winters, *J. Vac. Sci. Technol.* 16, 391 (1979).

зидовима (односно, нема поткопавања). Ово је једино могуће остварити применом неравнотежних плазми а уз комбинацију природног пада потенцијала и спољашње примењеног додатног потенцијала могу се енергије јона увећати до неколико стотина eV. Познати аналогон анизотропног нагривања било би копање бунара као алтернатива прављењу бунара коришћењем експлозива.

Трећа особина је да су плазме ефикасни произвођачи радикала и других реактивних честица. Ове честице су обично неутралне и лако стижу до површина и адсорбују се на њима. Када јони велике енергије ударе у површину, ту се раскидају везе појединачних атома из кристалне структуре и остатка решетке. На та слободна места долазе радикали. На пример, стандардни гас за плазма нагривање је CF_4 (уз додатак O_2 и Ar). Дакле на површину која је прекривена адсорбованим атомима флуора (F) падају практично под правим углом енергични јони аргона (Ar^+) и везе Si са остатком кристалне решетке се кидају а на место других атома силицијума корак по корак долазе атоми флуора. Када се формира SiF_4 он није везан за површину, а како је то волатилан (испарив) молекул, на тај начин вакуумске пумпе полако односе силицијум са дна структуре која се производи.

Без ове три особине које једино имају неравнотежне плазме (или неких нових идеја које се данас не називају) наша процесорска моћ би била на нивоу интегрисаних кола од око 2000 транзистора, а наша рачунарска моћ на нивоу програмабилних ручних калкулатора. Слично важи и за меморијска интегрисана кола.

Основна парадигма у физици плазме, а и у физици у целини, јесте идеја о термодинамичкој равнотежи. Термодинамичка равнотежа даје могућност прављења генералних закона и та универзалност привлачи, али, нажалост, термодинамичка равнотежа не постоји иако постоје системи који су наизглед доста близу. Опис неравнотежних система је веома сложен. Те елементарне процесе треба окупити помоћу кинетичке теорије и кинетичког описа свих процеса и применити то имајући у виду специфичности физике плазме. Ова књига даје основе физике судара и транспорта наелектрисаних честица у гасу и на површинама, основе саме физике плазме и описује како се сви ови елементи могу укомпоновати у једну технологију која је кључна како за развој бројних линија производње тако и за будући напредак.

Делови модела – делови књиге

Основни елементи физике неравнотежне плазме каква се користи у производњи интегрисаних кола садржај су ове књиге. Међутим,

књига није генерални уџбеник физике плазме јер садржи, пре свега, опис радиофреквентних плазми какве су неопходне због захтева да се претежно обрађују непроводни материјали. Ипак, опис неких елемената јесте универзалан и примењив шире.

Битан елемент су, пре свега, судари електрона са молекулима и гасовима, еластични и нееластични (ротациона, вибрациона и електронска екситација, дисоцијација), неконзервативни процеси попут јонизације и захвата. Судари се описују преко пресека за расејање који представља вероватноћу расејања зависно од енергије али и од угла расејања. У плазма-моделима потребно је обезбедити комплетне сетове података у смислу баланса енергије, импулса и броја честица, и постоји добро фундирана процедура по којој се формирају такви сетови пресека. Квантни феномени су део облика и вредности пресека за расејање и овако једноставан начин описа квантних феномена је последица чињенице да сами судари (када доминира квантна механика) трају знатно краће но време прелета између два судара те је могуће локализовати дејство квантне механике у времену и укључити је преко ефективних пресека.

Основа одређивања сетова пресека је такозвана физика ројева која се бави условима у којима су густине наелектрисаних честица довољно мале да спољашње електрично поље није пертурбовано просторним наелектрисањем. Физика ројева је гранични случај, где наелектрисане честице добијају енергију од спољашњег поља а губе је у сударима са молекулима гаса и где су судари са побуђеним молекулима или продуктима дисоцијације и јонизације занемариви. У таквим условима, с обзиром на то да је расподела ансамбла честица по енергијама широка, говори се о усредњеним особинама или транспортним и брзинским коефицијентима. Мерењем усредњених особина даје се основа за проверу сва три баланса комплетног сета пресека. Поред одређивања транспортних особина и нормализације пресека модел ројева се може директно применити код низа практичних плазми, попут атмосферских пражњења слабијег интензитета, детектора елементарних честица, пробоја у гасовима и других.

Паралелно са мерењем транспортни коефицијенти се морају рачунати из функције расподеле по енергијама која се израчунава на основу кинетичке теорије односно на основу решавања Болцманове (Boltzmann) једначине или Монте Карло (Monte Carlo) симулација. Прецизност и поузданост ових прорачуна је кључна те су неопходне провере, било принципијелне тачности и ограничења у домену решења (2 члана у развоју по сферним хармоницима према комплетном развоју), било нумеричких процедура коришћењем тест прорачуна (benchmark).

Прорачуни се могу вршити у константном али и у наизменичном електричном пољу (као и у комбинацији електричног и магнетног поља).

На сличан начин се описују судари и транспорт јона и супер-термалних неутрала.

У условима пертурбованог електричног поља неопходно је решити једначине преноса флуида наелектрисаних честица како би се одредила просторна расподела наелектрисуња и спрегнуто само-усаглашено добило и решење профила електричног поља. Ослобађањем довољног наелектрисуња долази до пертурбовања спољашњег електричног поља и поред транспорта и кинетике судара мора се спрегнуто са осталим једначинама решавати и Поасонова (Poisson) једначина.

Јако битан део плазма електронике су судари на површинама, од судара јона из којих се емитују секундарни електрони, преко свих осталих врста судара јона па до рефлексије неутрализованих јона. Посебна тема физике површина је адсорпција радикала, атома и наелектрисуња, као и поновно ослобађање адсорбованих честица. Наравно, кинетика плазма-нагризања, формирање профила и неправилности, као и депоновано наелектрисуње на површинама, део су фокуса на крајњу примену.

Свеобухватни модел плазме у свом језгру садржи и део за податке о пресецима и транспортним коефицијентима који обично екстерно захтева решавање Болцманове једначине или интерно захтева Монте Карло симулације транспорта електрона. Код флуидних модела се остаје на репрезентацији коришћењем флуидних једначина и посебно одређених транспортних коефицијената, док се код хибридних модела приелектродни слојеви посебно описују Монте Карло симулацијама како би се адекватно репрезентовао нелокални (зависи и од локалног поља и од поља у претходно пропутованим деловима плазме) транспорт у тим областима или посебно за електроне више енергије. Следећи слој модела је опис кретања јона, обично, али не увек, само решавањем флуидних једначина јер су јони скоро по правилу у основном делу плазме јако ниских енергија готово на собној температури, а значајне енергије добијају тек у јаким пољима у приелектродној области. Комбинацијом расподела електрона и јона добија се и расподела електричног поља.

У ширем кругу кода за моделовање описују се процеси на површинама плазма нагризање у више корака, кретање честица по површини, развој профила, развој наелектрисуња у наноструктурама. Неки од кодова, као што је описано у књизи, симулирају и понашање електронских елемената под дејством јаким индукованих поља (која неретко изазивају и оштећење елемента) и ултраљубичастих зрака.

Интелектуална основа: феноменологија неравнотежне плазме, синтезе и аналогije

Описивање неравнотежне плазме које је предузето инспирисано улагањима зарад оптимизације производње интегрисаних кола мора по дефиницији да буде у директној вези са фундаменталним истраживањима у више равни. Пре свега ту су подаци, и аутори књиге спадају у главне творце специјализованих детаљних сетова података. Други ниво јесте у описивању процеса, можемо га назвати разумевање основне феноменологије. Две занимљиве ствари су проистекле из ове сарадње, синергизам који је ефективно деловао и на примене и на познавање основа физике плазме.

Као прво треба идентификовати просторно-временске релаксационе дужине које обезбеђују уравнотежење (са локалним пољем – не термодинамичку равнотежу). Како је брзина релаксације енергије и импулса јона и електрона драматично различита, постојаће врло широк спектар услова у којем су брзине промена електричног поља веће од способности јона да их прате а мање од брзине реаговања електрона па електрони могу лако да се прилагоде променама. То су управо најбољи услови за настанак такозваних кинетичких феномена које је без праћења понашања целог ансамбла у целом простору тешко објаснити. Дакле, прва посебност неравнотежних плазми је да појединачни елементарни процеси, пре свега судари електрона имају драматично велики утицај на природу и кинетику плазме. Друга особина је, међутим, у складу са изреком да нема проблема већ само постоје прилике, да се ова комплексност може користити за постизање жељених особина плазме и карактеристика процеса подешавањем састава гаса, фреквенције напајања плазме, додатним једносмерним напоном, избором хемијских процеса који ће бити основа, протоком гаса, неутрализацијом или јонизацијом честица и многим другим процесима. Овде ћемо навести три примера где елементи презентирани у овој књизи могу да се комбинују како би се добиле кључне, фундаменталне особине процеса које се примењују данас у пракси (производњи).

Коришћењем два напајања на значајно различитим фреквенцијама (на пример на 1 MHz и на 100 MHz) може се добити да се једним напајањем контролише производња плазме, њена густина па самим тиме и флуks честица на површину силицијума а другим да се контролише енергија јона. Овим се могу раздвојити два кључна процеса и могу се независно контролисати без утицаја на други процес. Уколико се не поштује ова процедура модулација напајања за контролу

енергије доводи до паљења и гашења плазме, што је непожељно у практичној примени³. Данас се у лабораторијама посебно контролисаним импулсима добија цео спектар фреквенција који омогућава контролу енергијске расподеле јона (без промене флукса). Ипак, у пракси се још увек користе уређаји са две или три фреквенције.

Бомбардовање силицијума и диелектрика (који служи за интерконекте) врши се јонима велике енергије јер једино они могу да добију енергију од приелектродног јаког поља (које иначе кочи електроне), имају масу потребну да се физичким рапсршивањем прекину везе кристалне решетке и могу да продру у унутрашњост материјала како би активна запремина била релативно велика. Истовремено ти догађаји су довољно ретки да нема повећања температуре површине и гаса јер се кинетичка енергија распрши по целој запремини кристала и одведе од површине. Оно што се, међутим, не одводи јесте наелектрисање при нагризању диелектрика. Оно се гомила на површини и због малих димензија наноструктура које се производе на нанокондензаторима на површини јављају се веома велики напони. Ови напони могу да зауставе процес нагризања, да скрену путање јона и доведу до поткопавања или да изазову зависност брзине нагризања од ширине вертикалног отвора који се ископава односно од положаја на силицијумској плочици. Једноставним прорачуном добија се податак да је максимална дубина која се може ископати једнака седмострукој ширини без посебних интервенција⁴. Поред импулсног рада пражњења, које омогућава да се унутрашњост наноструктура разелектрише (што до сада није имало много успеха), предложена је идеја да се замене брзи јони брзим неутралима који настају у размени наелектрисања између јона и неутрала^{5 6}. Примена нагризања са брзим неутралима омогућила је до сада укопавање контактних рупа са аспектом од један према двадесет, а очекује се да ће ова техника моћи да се користи и даље. С друге стране, откривено је

³ T. Kitajima, Y. Takeo, Z. Lj. Petrović and T. Makabe, "Functional separation of biasing and sustaining voltages in two frequency capacitively coupled plasma", *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000): 489–491.

⁴ J. Matsui, N. Nakano, Z. Lj. Petrović and Toshiaki Makabe, "The effect of topographical local charging on the etching of deep-submicron structures in SiO₂ as a function of aspect ratio", *Appl. Phys. Lett.* 78, 7 (2001): 883–885.

⁵ Z. Lj. Petrović and V. D. Stojanović, „The role of heavy particles in kinetics of low current discharges in argon at high electric field to gas number density ratio“, *J. Vac. Sci. Technol. A* 16 (1998): 329–336.

⁶ Z. Lj. Petrović and A. V. Phelps, "Energetic ion, atom, and molecule reactions and excitation in low-current H₂ discharges: Na Doppler profiles", *Physical review E* 80, (2009): 066401.

да наелектрисање на површини и јонско реактивно нагризање прави површину која има неравнине реда 2–3 nm, што ограничава резолуцију на више од 30 nm. Дакле, сваки досадашњи напредак на 30 nm и ниже омогућен је применом нагризања брзим неутралима. Тренутно се планирају и развијају технике које ће омогућити смањивање димензија на 5 nm.

Закључак: Неравнотежни процеси и будућност компјутера као и будућност примена уз помоћ физике плазме

Посебна особина јона и неутрала је да они због своје велике масе не могу да приме енергију у сударима од електрона дозвољава електронима да приме велике енергије од поља док јони остају практички на собној температури у центру плазме. Избором услова ми можемо да контролишемо ту особину (у првом кораку она контролише функцију расподеле електрона по енергијама па потом контролише просторну расподелу наелектрисања и друге особине плазме) која иначе директно омогућава анизотропно нагризање и даљи напредак.

Истовремено откривамо нове феномене који раније нису били познати као што су негативна апсолутна проводност, негативна транзиентна дифузија, аномална РФ дифузија, негативна диференцијална проводност (стационарна, транзијентна и изазвана неконзервативним процесима) и многи други. Нема дилеме да су ти феномени пример високог степена интелектуалне синтезе на основу научног поступка и да представљају идеје које се могу примењивати сасвим генерално. Истовремено ти процеси се редовно јављају и помажу да разумемо технолошке плазме па чак понекад и омогућавају саму технологију.

Постојеће знање је довољно за развој технологија са резолуцијом до 5 nm. Тако стечено знање је већ отворило и развој извора неравнотежне плазме која ради на атмосферском притиску а то је опет отворило експлозију примена у медицини, технологијама материјала и пољопривреди. Заједничко за све те примене и постојећи и будући развој је способност контроле неравнотеже у плазми и њено контролисање познавањем и коришћењем атомске физике и транспортне теорије.

САША ДУЈКО

КРАТАК ПРИКАЗ МОНОГРАФИЈЕ

Убрзани прогрес дигиталне електронике и информационих технологија у последњих 40 година драматично је променио природу социјалних интеракција између људи у савременом друштву, али и глобални карактер цивилизације, и то више него било које друго научно достигнуће у целокупној историји човечанства. Тај прогрес је последица изванредних способности микроелектронике и наноелектронске индустрије у погледу минијатуризације интегрисаних кола и функционализације нових материјала. Напредак дигиталне електронике и њен трансфер у савремену технологију смањили су трошкове производње интегрисаних кола, што је довело до значајног пораста продуктивности али и побољшања квалитета живота кроз пролиферацију компјутера и потрошачке електронике.

Једна од најважнијих технологија која је заслужна за рапидан развој дигиталне електронике је технологија процесирања материјала плазмом. У основи ове технологије налазе се механизми за настајак и одржавање неравнотежне плазме и њено накнадно коришћење за модификацију површина металних и диелектричких материјала у широком опсегу просторних и временских скала. Неравнотежне плазме настају у електричним гасним пражњењима и представљају изворе јона, радикала и брзих неутрала који су одговорни за процесе на површинама материјала који се третирају. Наношење танких слојева и филмова, нагризање плазмом, јонска имплементација и допирање, распршивање и чишћење материјала примери су процеса на површинама. За оптимални дизајн, контролу, ефикасност и репродуцибилност процеса у производњи интегрисаних кола неопходно је детаљно познавање физичких и хемијских особина неравнотежне плазме. Да би се ово постигло, развијен је читав низ дијагностичких техника и нумеричких модела. Комплетан модел неравнотежне плазме захтевао би самоусаглашено решавање транспортних једначина за наелектрисане честице и неутрале са електричним и магнетским пољима и са једначинама које описују кинетику процеса на површинама и најважнијим плазма-хемијским реакцијама. Ово је изузетно комплексан модел и до сада није развијен, а претходна истраживања су углавном била фокусирана на појединачне и специфичне аспекте у примени неравнотежне плазме за производњу интегрисаних кола. Међутим, за одржавање историјског тренда у погледу смањивања цене производње и даље минијатуризације интегрисаних кола, што води као порасту броја ин-

тегрисаних кола на силицијумским узорцима који се може описати добро познатим Муровим законом, неопходни су управо овакви комплетни модели који би били базирани на фузији читавог низа физичких и инжењерских дисциплина и вештина, почевши од атомске и молекуларне физике, физике јонизованих гасова и неравнотежне плазме, физике површина, хемије, техника за решавање Болцманове једначине и Максвелове електромагнетске теорије.

Монографија *Plasma electronics: applications in microelectronic device fabrication* (second edition) управо разматра најважније аспекте ових појединачних дисциплина са циљем развоја модела који би омогућили предикцију просторно-временски разложених карактеристика неравнотежне плазме и асоцираних процеса на површинама које се третирају. Монографија је базирана на предавањима које су аутори Т. Макабе и З. Љ. Петровић одржали на постдипломским студијама на престижном Кеио Универзитету у Јокохами, у Јапану. Ово је друго издање монографије, које је значајно унапређено у односу на прво. Ново, 13. поглавље је посвећено неравнотежним плазмама на атмосферском притиску, где је посебан акценат стављен на микроплазме и ефекте грејања гаса на структуру пражњења. Поглавље 12 је проширено разматрањем процедура за производњу МОС транзистора и микроелектромеханичких система (МЕМС). Претходна поглавља су такође унапређена са мноштвом нових слика, табела и вежбања. У оквиру сваког поглавља налазе се задаци, питања и вежбања, што ову монографију чини идеалним избором за напредни универзитетски уџбеник али и за самостални рад, проверу и обнову знања искуснијих истраживача и инжењера. На крају сваког поглавља налази се списак референци, што заједно са чињеницом да се тематика излаже у раздвојеним али међусобно кохерентним целинама, омогућава читање појединачних поглавља без детаљног упознавања са материјалом који им претходи. Монографија има 412 страна и 176 црно-белих илустрација.

Након Увода, Феноменолошког описа транспорта наелектрисаних честица у гасовима и Макроскопских карактеристика плазме, пажњу привлачи четврто поглавље, које је посвећено елементарним процесима у гасној фази и на површинама. На оригиналан начин приказани су основни елементи квантне и класичне теорије расејања и сударних процеса електрона/јона са неутралима позадинског гаса. Посебна пажња је посвећена анализи неконзервативних судара електрона са атомима и молекулима гаса имајући у виду да ови процеси не само што индукују дуалну природу транспортних коефицијената електрона (и јона) већ имају кључну улогу у механизмима настајања и одржавања

плазме. Неравнотежне плазме настају и одржавају се електронском сударном јонизацијом позадинског гаса под утицајем спољашњих електричних и магнетских поља. Поред електронске сударне јонизације, илустровани су случајеви гасних смеша у којима Пенингова и асоцијативна јонизација могу имати једнако важну улогу. Типичан пример су смеше племенитих гасова и металних пара које се користе у ласерској техници и за производњу извора светлости. С друге стране, негативни јони који настају у различитим типовима дисоцијативног захвата електрона контролишу плазма-кинетику мењајући концентрацију електрона, смањујући плазма потенцијал и модификујући просторне расподеле других наелектрисаних честица укључујући расподеле реактивних радикала. Овде је веома важно напоменути да пресеци за захват електрона ротационо и вибрационо побуђених молекула расту са порастом ротационих и вибрационих температура. Поред ротационо и вибрационо побуђених молекула, метастабилни, чија популација може бити значајна у неравнотежним плазмама, такође могу бити основа за интензивирање процеса јонизације и захвата електрона.

У петом и шестом поглављу су приказани основни елементи кинетичке теорије за решавање Болцманове једначине за електроне и описане су основне карактеристике транспорта електрона и јона у неутралним гасовима. Болцманове једначина у нотацији коју користе аутори монографије дата је на следећи начин:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial g}{\partial r} + \frac{e}{m} [E + v \times B] \cdot \frac{\partial g}{\partial v} = J(g, F),$$

где су $g = g(r, v, t)$ брзинска функција расподеле електрона, e и m су наелектрисање и маса електрона, а E и B су вектори електричног и магнетског поља. Са десне стране ове једначине налази се колизиони оператор J који описује еластичне, нееластичне и неконзервативне сударе електрона и у општем случају зависи од функције расподеле позадинског гаса F . Уколико су степени јонизације мали, интеракције између наелектрисаних честица се могу занемарити па је колизиони оператор линеаран у односу на брзинску функцију расподеле електрона.

Електрони јонизују и дисосују позадински гас, а у тим процесима настају радикали. Решавањем Болцманове једначине добијају се функције расподеле, брзински коефицијенти за јонизацију и дисоцијацију и друге транспортне особине електрона чије познавање је неопходно за квантификацију флуксева радикала којима се модификују површи-

не. Моделовање неравнотежне плазме одвија се или кроз директну имплементацију пресека за расејање наелектрисаних честица у кинетичким моделима или кроз имплементацију транспортних коефицијената електрона и јона у флуидним моделима и у том смислу прва и најкритичнија фаза моделовања је егзактно решавање Болцманове једначине. Међутим, аутори су се одлучили за нешто другачији али једнако легитиман приступ: на почетку петог поглавља у коме се излажу основни елементи кинетичке теорије су приказане и дискутоване једначине баланса концентрације, импулса и енергије електрона које су добијене као брзински моменти Болцманове једначине. Ове једначине се налазе у основи различитих типова флуидних модела који су детаљно описани у седмом поглављу. Обично се ове једначине дају без описа сударних чланова, што није случај са овом монографијом: у овој монографији детаљно су описани колизиони чланови у флуидним једначинама и њихова веза са колизионим интегралом у Болцмановој једначини. Истовремено, на транспарентан начин користећи физичке аргументе, описани су методе за апроксимацију тензора притиска и вектора енергијског флукса које су неопходне за затварање система флуидних једначина.

Формализам који аутори користи за решавање Болцманове једначине базиран је развоју функције расподеле по сферним хармоницима у брзинском простору, а за опис просторних зависности користи се хидродинамичка апроксимација. Овај формализам се може описати следећим развојем:

$$g(r, v, t) = \sum_k g^k(v, t) \times (\nabla_r)^k n(r, t) = \sum_k \sum_{mn} g_{mn}^k(v, t) Y_{mn}^l(\theta, \varphi) \times (\nabla_r)^k n(r, t),$$

где су $g^k(v, t)$ компоненте брзинске функције расподеле различитог реда у степену реду градијента концентрације електрона, а $Y_{mn}^l(\theta, \varphi)$ су сферни хармоници у Морсе–Фешбаховој репрезентацији. Хидродинамичка апроксимација је валидан концепт уколико се разматра транспорт у условима малих градијената концентрације електрона, а то значи у областима које су удаљене од физичких површина и извора/понора честица. Развојем функције расподеле и интеграцијом Болцманове једначине у брзинском простору добија се хијерархија међусобно спрегнутих диференцијалних једначина за компоненте функције расподеле чијим нумеричким решавањем се могу добити транспортни коефицијенти електрона у функцији интензитета спољашњег електричног и магнетског поља.

У шестом поглављу приказани су основни трендови понашања средње енергије, брзине дрифта, дифузионих коефицијената и брзинских коефицијената за појединачне сударне процесе за већи број атом-

ских и молекулских гасова у временски константним електричним пољима. Ови транспортни коефицијенти су неопходни као улазни подаци у флуидним моделима неравнотежне плазме. Детаљно су описани кинетички феномени попут негативне диференцијалне проводности и анизотропије дифузије који се не могу тривијално предвидети на основу појединачних судара и ефеката поља.

Посебна пажња је посвећена основним карактеристикама транспорта електрона у временски променљивим електричним пољима. Указано је на неадекватност квазистатичке апроксимације, апроксимације ефективног поља и квазистатичког третмана појединачних компоненти функције расподеле у сферно-хармонијској декомпозицији Болцманове једначине у радио-фреквентној области која је од кључне важности у микроелектроници. Највећи број реактора плазме који се користе за производњу интегрисаних кола користе радио-фреквентне плазме која се генеришу и одржавају применом електричних и магнетских поља у различитим конфигурацијама и чије су фреквенције од 0.1 MHz до 1 GHz. На овај начин добијају се плазме велике густине и велике концентрације електрона чије се средње енергије крећу у опсегу од 1 до 5 eV. Велике густине плазме омогућавају велике брзине површинских интеракција на узорцима који се третирају уз истовремено смањење потенцијала на електродама или зидовима реактора, што смањује енергију јона. Смањењем енергије јона смањују се оштећења узорака који се третирају али и самог реактора плазме. Приказане су једначине за релаксационе константе импулса и енергије а упоређивањем ових константи са фреквенцијом поља идентификоване су три кључне области транспорта и домени применљивости горенаведених апроксимација. Временски разложена негативна диференцијална проводност и аномална анизотропна дифузија два су најрепрезентативнија примера кинетичких феномена у временски променљивим пољима. Ти феномени су објашњени концептом временске нелокалности који се у савременим моделима неравнотежне плазме веома ретко користи за разлику од концепта просторне нелокалности. Ти кинетички феномени добијени су тзв. директном нумеричком процедуром за решавање Болцманове једначине.

У седмом поглављу је дискутовано о различитим моделима неравнотежне плазме. У флуидним моделима једначине за баланс концентрације, импулса и енергије спрегнуте су са Пуасоном једначином којом се укључују ефекти просторног наелектрисања на расподелу електричног поља. Уколико је реч о изразито неравнотежном систему, потребно је укључити што већи број флуидних једначина за чије затварање се може користити или апроксимација локалног електричног поља или тзв. апроксимација средње енергије. Аутори

дискутују и о флуидним моделима система који се налазе у локалној термодинамичкој равнотежи. Такви системи су једноставнији за анализу и својствени су плазмама са високим степеном јонизације у којима су електрон-електронски судари врло ефикасни у Максвелизацији функције расподеле. Модел релаксационог континуума заслужује посебну пажњу јер је примењив како за квазинеутралну балк област плазме тако и за приелектродну област у којој постоје велики градијенти поља и концентрације наелектрисаних честица. Модел је базиран на стандардним једначинама за баланс енергије и импулса али уводи се корекција на електрично поље којом се адекватно описују процеси релаксације енергије који се одвијају на временским скалама које могу бити неколико редова величине веће од времена потребног за релаксацију импулса. На тај начин се заобилазе недостаци флуидног третмана и на изванредан начин уводе кинетички елементи у модел. Поред флуидних модела, аутори су посветили значајну пажњу Монте Карло симулацијама и тзв. *particle in cell* моделима који су базирани на праћењу трајекторија индивидуалних честица у брзинском и конфигурационом простору.

Неравнотежне плазме које се користе у микроелектроници за производњу интегрисаних кола базирани су на великом броју сударних и транспортних процеса електрона, јона и радикала, који се одвијају са веома различитим временским константама и на веома различитим просторним скалама. Због те чињенице, диференцијалне једначине којима се описују процеси су комплексне и веома захтевне за решавање. Иако то није пракса у литератури посвећеној физици плазме, осмо поглавље ове монографије посвећено је нумеричким техникама за решавање диференцијалних једначина којима се описује динамика процеса. Највећа пажња је посвећена нумеричком решавању временски зависне дрифт-дифузионе једначине и Пуасонове једначине. Аутори предлажу методу коначних разлика за просторну дискретизацију извода, а за нумеричку интеграцију у времену Гиров алгоритам. Предложени су начини за тестирање стабилности и тачности решења. Посебна пажња посвећена је Шарфетер–Гамеловом методу за решавање временски зависне дрифт-дифузионе једначине у ситуацијама када је допринос дрифта много већи од дифузије електрона, што одговара приелектродним областима. Описани су начини за спецификацију и имплементацију граничних услова како у идеализованим условима без површинских интеракција тако и у реалистичнијим ситуацијама металних и диелектричких електрода.

У деветом и десетом поглављу дискутује се о капацитивно и индуктивно спрегнутим плазмама. Механизми за одржавање и функционисање тих плазми, нелокалан и нелинеаран транспорт електрона

и ограничења дубине простирања електромагнетних таласа који се користе за грејање, апсорпцију снаге и одржавање плазме, анализирани су на основу резултата добијених у нумеричким симулацијама али и на основу оптичке емисионе спектроскопије и компјутерске томографије. Те напредне дијагностичке технике аутори су развијали током последњих 25 година. У једанаестом поглављу се дискутује о магнетронским плазмама које се користе за депозицију танких слојева на узорцима. Велики број реактора плазме користи електромагнете, перманентне магнете или индукована магнетска поља са циљем пораста густине и просторне униформности плазме изнад узорака који се третирају али и због побољшања електронског конфинирања и губитака електрона на зидовима комора. Радио-фреквентни магнетрони и плазме базиране на електронској циклотронској резонанци примери су које аутори анализирају.

Дванаесто поглавље ове монографије посвећено је процесирању плазмом. Депозиција металних филмова, основе физичког спатеровања у магнетронским плазмама и тзв. плазма хемијска депозиција у гасној фази анализирају се у условима који одговарају онима који се могу наћи у индустријским реакторима плазме. Много већу пажњу аутори су посветили процесу нагривања материјала плазмом. Описани су процеси нагривања силицијума, силицијум-диоксида и алуминијума. Нагривање плазмом има две екстремно супростављене фазе, а то су изотропно нагривање неутралним радикалима и анизотропно нагривање високоенергијским јонима који настају у пражњењу. Аутори су приказали нумерички метод за прорачун просторно-временских промена на узорку који се нагрива. У последњем, тринаестом поглављу аутори разматрају неравнотежне плазме на атмосферском притиску. У фокусу су микроплазме и ефекти грејања гаса на структуру микропражњења.

Монографија *Plasma electronics: applications in microelectronic device fabrication* (second edition) дело је од изузетне научне вредности, резултат вишедеценијског рада аутора у области плазма-електронике и њене примене у микроелектроници за производњу интегрисаних кола. Интегришући физику, нумеричке методе и примене у домену микроелектронике, аутори су на јединствен начин дали комплетан преглед физике неравнотежне плазме и технике процесирања плазмом. Ова књига је незаобилазан извор информација и знања за све оне који желе да науче више о неравнотежним плазмама и њеним применама у микроелектроници. Јасно написана и добро илустрована, ова књига ће несумњиво постати стандардна референца за истраживаче и инжењере који су заинтересовани за иновације у микроелектроници.

