

САВЕЗНИ ЗАВОД ЗА МЕРЕ И ДРАГОЦЕНЕ МЕТАЛЕ  
у сарадњи са  
СРПСКОМ АКАДЕМИЈОМ НАУКА И УМЕТНОСТИ  
и  
ЦРНОГОРСКОМ АКАДЕМИЈОМ НАУКА И УМЈЕТНОСТИ

125

1873 - 1998

**СИМПОЗИЈУМ О  
МЕРЕЊИМА  
И МЕРНОЈ ОПРЕМИ**

**ЗБОРНИК РАДОВА  
КЊИГА ПРВА**



Београд, 1998.



## Мерења пресека за еластично расејање електрона на атомима метала

Радмила Панајотовић<sup>1</sup>, Братислав Маринковић<sup>2</sup>, Душан Филиповић<sup>3</sup>,  
Владимир Пејчев<sup>4</sup>

**Кратак садржај.** Експерименталним методима електронске спектрометрије одређени су диференцијални и интегрални пресеци за еластично расејање електрона ниских упадних енергија на атомима метала Na, Mg, Zn, Cd, Hg. Детаљно је дискутована експериментална процедура мерења и грешке мерења. Показано је и постојање резонантних појава у еластичном каналу расејања електрона.

## Cross-section measurements for elastic electron scattering on metal atoms

**Abstract.** Differential and integral electron cross sections for elastic scattering on Na, Mg, Zn, Cd, and Hg metal atoms were determined at low electron impact energies by means of experimental electron spectrometry methods. The experimental procedure as well as errors are discussed in detail. The existance of resonant phenomena in the elastic channel of electric scattering is shown.

### 1. Увод

Процеси мерени у експериментима расејања електрона на атомима обухватају еластично расејање, ексцитацију и јонизацију. Сваки од ових процеса се карактерише величином која се назива пресеком. Тако се за млазове неполаризованих електрона и атома, тј. оне где су спинови оба млаза стохастички распоређени у простору, дефинише диференцијални пресек за

<sup>1</sup> Радмила Панајотовић, истраживач сарадник, Института за физику, Предревница 118, 11080 Земун

<sup>2</sup> Др Братислав Маринковић, научни сарадник, Института за физику, Предревница 118, 11080 Земун

<sup>3</sup> Др Душан Филиповић, доцент, Физички факултет, Универзитета у Београду,

<sup>4</sup> Студентски брз 12, 11000 Београд

Владимир Пејчев, редовни професор, Природно-математички факултет, Радоја Домановића 12, 34000 Краљево

еластично расејање као број еластично расејаних електрона тачно одређене енергије у јединици времена у јединични просторни угао  $d\Omega$  у правцу  $(\theta, \phi)$ . Интеграцијом диференцијалног пресека по свим угловима добија се интегрални пресек за еластично расејање електрона. Интегрални пресек зависи од упадне енергије електрона и карактеристичан је за сваки атом мету.

Диференцијални пресек за еластично расејање електрона се може експериментално одредити применом метода електронске спектрометрије. У суштини ове методе је посматрање бинарног судара електрона са атомом при чему се детекција расејаног електрона врши појединачно уз анализу енергије и угла расејања. Услове за бинарне сударе одређује концентрација честица мете у интеракционој запремини. Отуда је за овај тип експеримената потребно обезбедити високи вакуум као и применити технику укрштених млазева.

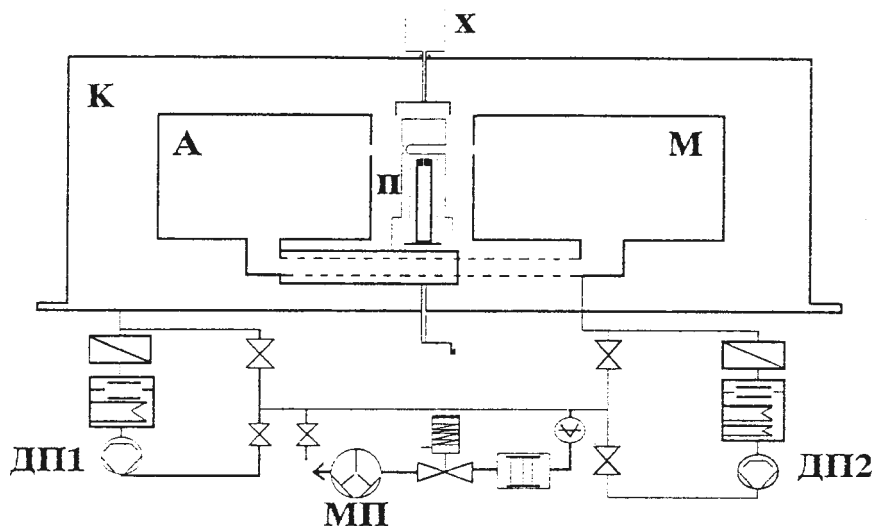
Једна од карактеристичних појава у расејању електрона на атомским честицама је појава резонанци. Оне се јављају при одређеним упадним енергијама електрона и манифестују наглим порастом пресека за расејање. Резонанце уствари представљају привремено формирање негативних јона у судару електрона и неутралног атома.

Значај мерња пресека за расејање електрона се пре свега види у моделовању процеса у плазми као и у физици ласера и астрофизици. Посебно је значајно за тестирање теоријских модела интеракција атомских честица.

## 2. Експериментални уређај

Експериментални уређај на коме се мере диференцијални пресеци за расејање електрона на атомским честицама је електронски спектрометар високог разлагања "ЕСМА". Он се састоји од извора електрона, извора атома и детектора. Схематски приказ апаратуре је дат на слици 1. У вакуумској комори (К) смештени су моноенергизатор (М), анализатор (А) и пећ за метале (П). У моноенергизатору се формира колимисан, моноенергијски млаз електрона пројектила. Анализатор има сличну конструкцију и служи за прикупљање и детекцију расејаних електрона.

Извор електрона је врло танка волфрамска нит кроз коју тече струја (типично 2.3 А). Електрони емитовани термоелектронском емисијом са катоде одлазе у простор електричног поља цилиндричних електростатичких сочива где се обликују у узани, добро колимисани млаз и усмеравају ка улазу у енергијски селектор. Селектор чини полусферни кондензатор чије су димензије 131 mm и 68.2 mm. После пролаза кроз поље селектора, електрони се убрзавају до жељене енергије и усмеравају ка интеракционом простору. Струје млаза електрона су реда од 1 nA до 10 nA. Електро-оптички систем је детаљно описан у раду Филиповића и коаутора [1].



Слика 1: Схематски приказ експерименталног уређаја ЕСМА:  
 К- комора, А- анализатор, М- моноенергизатор, П- пећ, Х- хладњак клопке за  
 паре метала, ДП1, ДП2- дифузионе пумпе, МП- механичка пумпа

Интеракциони простор је дефинисан пресеком хоризонталног млаза електроана, вертикалног млаза пара метала и прихватним просторним углом анализатора. Ова конфигурација представља примену технике укрштених млазева. Атомски млаз се формира у пећи Кнудсеновог (Knudsen) типа. Метал се загрева до температуре на којој је напон паре реда 10 Pa. Развијена су две пећи, једна за ниже температуре топљења а друга за више температуре. Прва пећ је израђена од немагнетног челика и у њој су топљени натријум, кадмијум и жива. Друга пећ је направљена од титана пре свега да би се избегло легирање цинка са челиком. У обе пећи је осварен градијент темперауре такав да је врх пећи на температури од око 50 °C вишој од самог талишта. Пећи су оклопљене титанијумским и бакарним облогама ради спречавања већих губитака топлоте радијацијом. Мерење температуре пећи се врши са два термопара, на дну и врху пећи, уз коришћење електричног еквивалента тачке топљења леда.

Након судара електрона и атома мете, електрони се расејавају у различитим правцима. Прикупљају се анализатором који се састоји од система цилиндричних електрода и полусферног селектора, слично моноенергизатору. Прихватни угао анализатора је  $10^{-3}$  sr. На крају анализаторског система налази се детектор, тј. једноканални електронски мултипликатор. То је спирална, стаклена цевчица чија је унутрашњост напарена полупроводним материјалом. Секундарном емисијом електрона из зидова цевчице постиже се фактор мултипликације реда величине  $10^8$ . Сигнал који се добија на крају детектора се појачава помоћу претпојачавача и појачавача, а затим упућује на дискриминатор. После тога, сигнал се шаље на бројач или на вишеканални анализатор, зависно од врсте анализе резултата. Са вишеканалног анализатора се резултати преносе серијском везом у компјутер где се врши даља обрада.

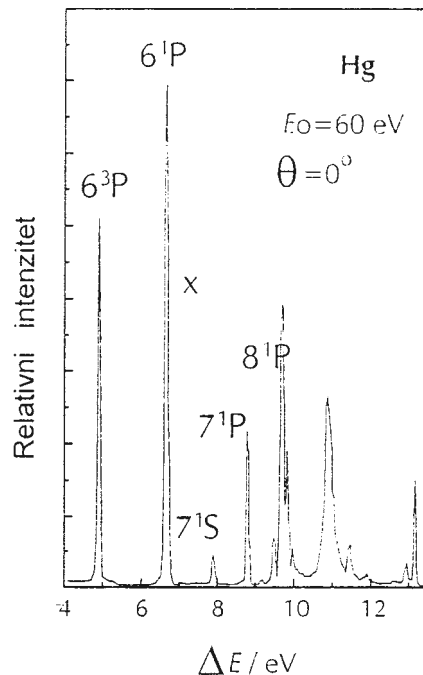
За остваривање услова оваквог експеримента потребно је постићи вакуум реда  $10^{-3}$  Pa у комори пречника 680 mm и висине 625 mm. У ту сврху се

користе две дифузионе пумпе (ДП1 испумпава комору а ДП2 електронско оптички систем) и једна механичка двостепена пумпа (МП) за предвакуум. Такође је потребно заштити унутрашњост коморе од магнетског поља Земље, због чега су зидови коморе изнутра обложени  $\mu$ -металном заштитом. Измерена јачина магнетске индукције на месту интеракционе запремине је мање од  $0,1 \mu\text{T}$ .

Опсег енергија упадних електрона је од  $2 \text{ eV}$  до  $100 \text{ eV}$ , а опсег углова анализатора је од  $-30^\circ$  до  $150^\circ$ . Могућности апаратуре су *i)* снимање спектра губитака енергије, *ii)* снимање угаоних расподела еластично и нееластично расејаних електрона (тј. диференцијалних пресека) и *iii)* снимање ексцитационих функција за побуђивање атома или резонанци у еластичном каналу расејања.

### 3. Експериментална метода

Апаратура се вакуумира након припреме материјала и пуњења пећи. Почетни радни притисак заосталог гаса у комори је реда  $0,2 \text{ mPa}$  (до  $2 \times 10^{-9} \text{ mbar}$ ). Прво се врши подешавање млаза електрона а затим се греје пећ са металом до постизања радне температуре. Крајње подешавање електронске оптике моноенергизатора и анализатора се врши на расејаном млазу, на интензивном резонантном стању. Положај нултог угла расејања се одређује из симетрије диференцијалног пресека на негативним и позитивним угловима расејања. Затим се врши снимање спектра губитака енергије да би се установило да не постоји појава двоструког расејања. Постојање двоструког расејања указује да



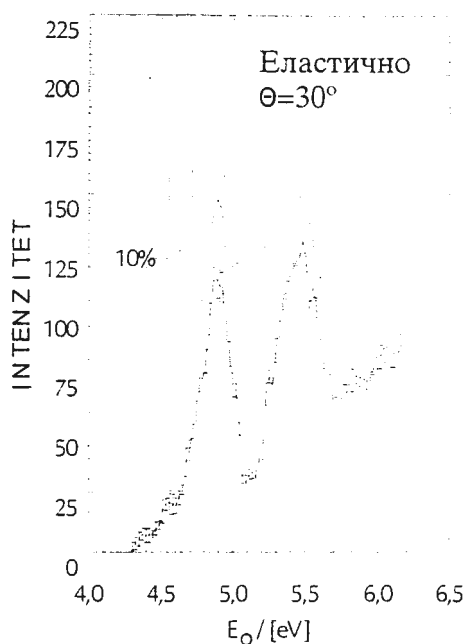
Слика 2 Спектар губитака енергије електрона упадне енергије  $E_0 = 60 \text{ eV}$  на нултом углу расејања електрона на атому живе

су нарушени услови за бинарне сударе и потребно је смањити температуру пећи а тиме и густину млаза атома. Спектар се сакупља у вишеканалном анализатору резолуције 1024 канала. Прикупљени спектри се затим пребацују у персонални компјутер на даљу обраду. Прикупљање спектра на малим угловима расејања траје неколико минута јер је сигнал довољно интензиван. За прикупљање спектра на већим угловима расејања, потребно је остварити дуготрајну стабилност целог система јер због слабог сигнала (сигнал може да опадне и за више од шест редова величине) сакупљање траје неколико часова.

Пример једног спектра губитака енергије на атому живе дат је на слици 2. Спектар је добијен тако што је моноенергизатор постављен да формира млаз електрона упадне енергије  $E_0=60$  eV док је на нултом углу расејања анализатор подешен да пропушта само оне електроне који су, побудивши различита стања атома, изгубили један део своје почетне енергије и то од 4 eV до 14 eV. На основу овог спектра може се уочити која се стања побуђују са највећом вероватноћом (у овом случају је то стање  $6^1P$ , енергије 6.7 eV). Са спектра се може видети која се стања могу енергијски раздвојити, тј. колика је енергијска резолуција спектрометра. Енергијска резолуција при снимању овог спектра је износила 80 meV.

Мерење угаоне расподеле је вршено подешавањем губитка енергије на одређено стање, односно на еластично расејање, и директним читавањем броја импулса на скалеру. Крива се мери од почетног угла до крајњег а затим се проверава стабилност повратком на почетни угао. Тиме је добијена једна крива угаоне расподеле у релативним јединицама. Мерење се понавља више пута под различитим условима подешавања електронске оптике. Затим се израчунава пондерисана аритметичка средина тих мерења при чему је пондер квадрат статистичке грешке. На тако добијене средње вредности угаоне расподеле мора се применити геометријски корекциони фактор да би се добио диференцијални пресек у релативним јединицама.

Геометријски корекциони фактор изражава промену интеракционе запремине са углом расејања. Он зависи од више параметара као што су: просторна расподела густине честица мете (врста и геометрија извора мете), просторна расподела флуksа електрона, геометрија система те просторни угао анализатора. У нашем раду користимо се разматрањима Brinkmann-а и Трајмар-а [2] који су дали општи случај израчунавања геометријског корекционог фактора. Упадна енергија електрона је грубо одређена напоном између средине нити за термоемисију електрона и интеракционе запремине која се држи на потенцијалу земље. Потенцијал нити је одређен прецизним напајачем фирме Хјулит Пакард (Hewlett Packard). За тачно одређивање енергије упадних електрона потребно је скановати упадну енергију и одредити положај неке резонанце. На сл. 3 је дат положај резонанци у еластичном каналу на углу расејања од  $30^\circ$  према радовима Albert et al [3] и Panajotović et al [4]. Калибрација енергијске скале се може извршити и одређивањем положаја резонанци у инертним гасовима као што је то урађено у раду [5] Према положају резонанци, могуће је одредити енергију упадних електрона са тачношћу од 10 meV.



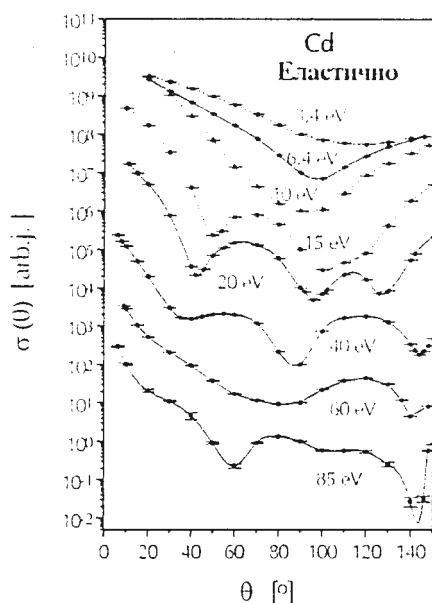
Слика 3 Резонанце у еластичном каналу расејања електрона на атому живе:  
 - - - - Albert et al [3], \_\_\_\_\_ Panaiotović et al [4].

Довођење пресека на апсолутну скалу се може извршити на више начина (нормирањем на интегралне пресеке, на теоријске прорачуне или оптичку јачину осцилатора). Код атома метала најпоузданији је метод нормирања на оптичку јачину осцилатора најинтензивнијег оптички дозвољеног стања. Крива релативног диференцијалног пресека се преведе једнозначно у криву генералисане јачине осцилатора у функцији квадрата момента преноса импулса. Екстраполацијом криве до нулте вредности преноса импулса, пресек са вертикалном осом се нормира на оптичку јачину осцилатора која је позната из оптичких спектроскопских мерења, до реда процента. Апсолутне вредности за еластично расејање и за ексцитацију осталих стања се одређују из количника интензитета најинтензивнијег, резонантног стања и сваког појединачног стања на једном углу, обично  $10^\circ$ , јер је на том углу мања статистичка грешка због јачих сигнала. Уколико је сигнал довољно велики, количник интензитета се одређује и на другом углу са мањом стрмином кривих јер то елиминише грешку услед нетачности у одређивању угла или неодређености услед коначности угаоне резолуције.

Посебан проблем код одређивања количника интензитета различитих стања представља одређивање трансмисије анализатора. Количник интензитета је у експерименту осетљив на начин фокусирања, тј. подешавања електро-оптичког система анализатора. Трансмисија анализатора нелинеарно опада са променом резидуалне енергије електрона у односу на ону која је фокусирањем подешена да оптимално пролази кроз анализатор. У циљу одређивања трансмисије анализатора начињен је низ посебних експеримената на атому кадмијума у којима су за сваку поједину упадну енергију електрона одређене вредности трансмисије са одговарајућом грешком у функцији резидуалне енергије електрона.

## 4. Резултати мерења

Еластично расејање електрона на металним парама је мерено на атомима натријума, магнезијума, цинка, кадмијума и живе. У току су мерења на атому цинка. Прелиминарна мерења су урађена при упадној енергији од 40 eV. Диференцијални пресеци за еластично расејање електрона на атому кадмијума у опсегу упадних енергија од 3,4 eV до 85 eV су приказани на слици 4. Уочава се да је на мањим упадним енергијама крива диференцијалног пресека мање стрма и да има један минимум. Са порастом упадне енергије број минимума се повећава. При највећим упадним енергијама и малим угловима расејања диференцијални пресек врло стрмо опада са повећањем угла расејања. Резултати мерења пресека на атому натријума и кадмијума дати су у раду [6].



Слика 4: Диференцијални пресек за еластично расејање електрона на атому кадмијума у опсегу упадних енергија електрона од 3,4 eV до 85 eV.

Диференцијални пресеци за еластично расејање на апаратури ЕСМА се могу измерити у опсегу угла од  $10^\circ$  до  $150^\circ$ . Мерења на мањим угловима су непоуздана због доприноса примарног млаза електрона које анализатор не може раздвојити од расејаних електрона. Мерења на већим угловима расејања су недоступна због физичких димензија моноенергизатора и анализатора. Да би се добио интегрални пресек потребно је екстраполирати диференцијални пресек до нултог угла расејања и до угла расејања од  $180^\circ$ . За форму криве екстраполације нам може послужити теоријски прорачун диференцијалних пресека. У недостатку оваквих прорачуна, екстраполација се може извршити помоћу Лежандрових (Legendre) полинома. Интеграцијом диференцијалног пресека од  $0^\circ$  до  $180^\circ$  добија се интегрални пресек за еластично расејање.

Вредности интегралних пресека за еластично расејање електрона на атомима натријума, цинка, кадмијума и живе дато је у табели 1. Упадне енергије електрона су 10 eV, 15 eV, 20 eV, 40 eV и 60 eV.

**Табела 1:** Вредности интегралних пресека за еластично расејање електрона упадних енергија 10 eV, 15 eV, 20 eV, 40 eV и 60 eV на атомима натријума, цинка, кадмијума и живе дати у јединицама  $10^{-20} \text{ m}^2$  са апсолутним грешкама мерења.

| Интегрални пресеци за еластично расејање |           |           |           |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| у јединицама $10^{-20} \text{ m}^2$      |           |           |           |           |           |
| $E_0 = 10 \text{ eV}$                    | 15 eV     | 20 eV     | 40 eV     | 60 eV     |           |
| Na                                       | 13.5±3.3  |           | 9.20±1.34 |           |           |
| Zn                                       |           |           | 4.63±1.63 |           |           |
| Cd                                       | 8.25±3.46 | 9.24±3.88 | 2.96±1.24 | 5.35±1.55 | 2.43±0.70 |
| Hg                                       |           | 12.2±2.1  |           | 8.33±1.54 | 6.86±0.99 |

Грешке мерења се могу раздвојити на грешке облика криве диференцијалних пресека, грешке апсолутне вредности диференцијалног пресека и грешке апсолутних вредности интегралног пресека. Статистичка грешка одброја на сваком углу мерења се добија из Поасонове (Poisson) статистике ретких догађаја. Појединачно мерење са својом статистичком тежином улази у израчунавање средње статистичке грешке мереног податка. Статистичке грешке тако варирају у зависности од броја мерења на датом углу, грешке сваког појединог мерења (интензитета сигнала) и међусобног одступања различитих кривих.

Систематске грешке код мерења релативних вредности диференцијалних пресека (облика кривих пресека) су пре свега у калибрацији енергијске скале, калибрацији угаоне скале и примени геометријског корекционог фактора. Енергијска скала је одређена са грешком од 0,2 eV док је угаона скала одређена са грешком од  $0,5^\circ$ . Ове неодређености доприносе грешки мерења облика од 1% до 5%, док је допринос геометријског фактора процењен у средњем на 5%. Тада се за грешку одређивања облика диференцијалног пресека узима корен збира квадрата појединих грешака.

Допринос грешки одређивања апсолутне вредности диференцијалних пресека дају тачност одређивања оптичке јачине осцилатора, тачност процедуре фитовања генералисаних јачина осцилатора и поузданост екстраполације података ка нултом преносу импулса, као и тачност одређивања количника интензитета резонантног стања и еластичног расејања. Значајан допринос грешки мерења долази од одређивања трансмисије анализатора. Диференцијални пресеци за еластично расејање одрешени су са тачношћу од 20% до 50%.

На вредност грешке интегралног пресека највећи утицај има грешка одређивања апсолутне вредности диференцијалног пресека. На њу се суперпонирају грешке екстраполације и интеграције диференцијалног пресека што све повећава грешку за око 10%.

## 5. Закључак

Истраживање фундаменталних интеракција електрона и атома пара метала је остварено помоћу експерименталног уређаја ЕСМА који представља електронски спектрометар високе резолуције. За одређивање апсолутних вредности пресека за интеракцију примењена је техника укрштених млазева и сложена процедура нормализације.

Рад са парама метала представља посебан изазов због тешкоћа у формирању млаза атома као и потребе спречавања галванских контаката услед депоновања охлађених пара на електро-опичком систему. Израђена су два типа оригиналних пећи за металне паре. Систематски се истражују атоми IIВ групе Периодног система. У току су мерења на атому цинка и у овом раду су саопштени прелиминарни резултати за еластично расејање електрона при упадној енергији од 40 eV.

У плану је даље систематско истраживање интеракције електрона са металним парама виших температура топљења. Ради комплетирања сударног експеримента планира се и мерење Стоксових (Stokes) параметара, тј. поларизације емитованих фотона након деексцитације побуђених атома.

## Литература

- [1] Filipović, D., Pejčev, V., Marinković, B., Vučković, L., *Fizika* 20 (1988) 421
- [2] Brinkmann, R.T., Trajmar, S., *J.Phys.E:Sci.Instrum.*12 (1979) 1741
- [3] Albert, K., Christian, C., Heindorff, T., Reichert, E., Schon, S., *J.Phys.B:At.Mol.Phys.*10 (1977) 3733
- [4] Panajotović, R., Pejčev, V., Konstantinović, M., Filipović, D., Bočvarski, V., Marinković, B., *J.Phys.B:At.Mol.Opt.Phys.* 26 (1993) 1005
- [5] Panajotović, R., Filipović, D., Marinković, B., Pejčev, V., Kurepa, M., Vučković, L., *J.Phys.B:At.Mol.Opt.Phys.* 30 (1997) 5877
- [6] Marinković, B., Electron impact cross sections for sodium and cadmium atoms, *Зборник Atomic collision processes and laser beam interactions with solids*, Eds. M.Milosavljević and Z.Petrović, Nova Science Publishers, Inc. New York, 1995, pp101-114