

Квантне тачке: нанотехнологија у квантним бојама

Мада је врло вероватно да ће проћи извесно време пре него што квантне тачке потпуно остваре свој технолошки потенцијал, ове малене честице већ су оставиле дубоки траг на животе људи

ТЕКСТ:

Станко Томић, *FlInstP*

КАДА СУ АЛЕКСЕЈ ЕКИМОВ, Луис Брус и Мунги Бавенди спровели своје прве експерименте са квантним тачкама, вероватно нико од њих није могао да наслути енорман утицај који ће ове малене честице имати на наш свакодневни живот и данашњу технологију.

Њихов рад, уз рад многих других научника, може се слободно назвати почетком нанонаука и нанотехнологије. И док су квантне тачке већ пронашле бројне примене, од QLED телевизора до медицине и дијагностике, ми смо заправо тек на самом почетку њихове употребе и свих квантних функционалности које могу да пруже.

Као признање за све ово, Екимов, Брус и Бавенди поделили су 4. октобра Нобелову награду за хемију за проналазак и синтезу квантних тачака. Квантне тачке су објекти нанометарске величине ($1 \text{ нанометар} = 10^{-9} \text{ метара}$) и направљене су од полупроводничких материјала. Боја светлости коју емитују у принципу је одређена једино њиховим пречником. Међутим, једном када досегнемо до димензија које се мере милионитим деловима милиметра, почињу да се појављују

ефекти који пред озбиљан изазов стављају нашу интуицију о реалности. То су квантни ефекти. Пут до прогреса који је резултирао данашњим стадијумом њиховог разумевања није био нимало једноставан. Наиме, тек након пола века истраживања ове наночестице су први пут синтетизоване на контролисан начин, што је омогућило њихову примену у лабораторијским условима или комерцијалним производима.

ОТКРИЋЕ

Својим бојама и естетиком, уметност витража нас опчињава још од времена старих Египћана и старог Рима. Зарад њихове израде и постављања у црквама, у средњем веку су почеле да се развијају технологије мешања честица различитих материјала са стаклом. Различите боје у витражу, које и данас можемо да приметимо, последица су хомогене расподеле малених честица различитих метала или метал оксида у стаклу. Свака боја повезана је са различитим материјалом или хемијским једињењем.

Опчињен овим ефектом Екимов је желео да одреди структуру и хемијски састав честица у стаклу у боји, као и механизам њиховог

ИЛУСТРАЦИЈА: Јаков Јаковљевић



нарастања, у најбољем случају на контролисан начин, употребом само једног материјала. Прве квантне тачке биле су синтетизоване као микроскопски кристали бакар хлорида (CuCl) у стаклу. Екимов је први пут приметио да ове честице испољавају квантне ефекте, тј. да таласна дужина светлости коју оне емитују (боја стакла) зависи од величине честица, а не од врсте материјала.

Некако у исто време, независно, Брус је синтетизовао квантне тачке и од кадмијум сулфата (CdS), овог пута у колоидалном раствору. Требало би имати у виду да говоримо о периоду хладног рата, током кога су совјетски научници публиковали своје радове на руском, да би се затим неки од њих преводили на енглески са временским заостатком. Брус је намеравао да произведе хемијску реакцију коришћењем сунчеве светлости, која би била апсорбована квантним тачкама. Квантне тачке би на тај начин обезбедиле потребну енергију за одржавање хемијских реакција.

Нешто касније, Бавенди је успоставио хемијски метод назван „вруће убризгавање“, који је омогућио синтезу квантних тачака произвољне величине и облика.

Једноставност ове методе лежи у захтеву да се прецизно контролишу једино температура колоидалног раствора и време излагања раствора који садржи потребне конститутивне елементе (рецимо кадмијум и селенијум) од којих ће се формирати квантна тачка спонтаним нараштањем у раствору. Данас се овом методом синтетишу

квантне тачке, без већих потешкоћа, од мноштва других материјала, као што су угљеник, силицијум, олово халкогени, од полупроводничких легура из треће и пете групе Менделеевог система елемената, перовскитних материјала, и многих других.

Своје данашње име „квантна тачка“ (енгл. *quantum dot*, или скраћено *QD*), увео је Марк Рид 1986. да би описао објекте нулте димензионалности који квантно конфинирају у сва три картезијанска правца. Квантна тачка, као назив за ове наночестице, била је логичан след након већ постојећих термина као што су „квантне јаме“ и „квантне жице“, које квантно конфинирају електроне у две и једној димензији редом.

Већ смо поменули да су квантне тачке нанообјекти, типично дијаметра од 2 до 100 нанометара. Ипак, у поређењу са атомом, чија је уобичајена димензија око 0,2 нанометра, димензија квантних тачака је 1000 и више пута већа. Оно што је фасцинантно код квантних тачака јесте да оне омогућавају постојање квантних ефеката. Посматрано са тачке гледишта једног атома, квантни ефекти се у квантним тачкама манифестују на макроскопском нивоу! На нашу способност да систематски контролишемо величину и облик квантних тачака, и на тај начин њихове квантне особине, од којих је свакако најважнија таласна дужина, односно боја светлости коју емитују фотолуминисценцијом, указује један термин који се често користи за њих – вештачки атоми направљени људском руком.

Принцип квантног конфинирања, колоквијално познат као проблем „честице у кутији“, који је тридесетих година прошлог века предложио Херберт Фрелих, представља теоријски основ за разматрање квантних тачака. Наиме, теоријски је могуће предвидети да особине извесних материјала могу да зависе не само од њихове структуре већ и од самих димензија честица, уколико су оне веома мале. Фрелих се бавио Шредингеровом једначином, чија решења налажу да када „кутија“ (у нашем случају квантна тачка) постане толико мала, простор за битисање електрона се до те мере сужава да мноштво електрона постаје „стиснуто“ заједно у изузетно малој запремини. Да би пронашли своје „место“ у кутији, електрони формирају, дискретан, квантни спектар стања у њој, налик оном у атому. Овај феномен се назива ефектом квантне величине. Квантне тачке, које су синтетизоване након више од 50 година од Фрелихових теоријских предвиђања, најубедљивија су и најконкретнија манифестација квантног конфинирања – манифестације материјала да мења своје особине како идемо ка нанообласти, а када достигнемо то да димензије објекта буду упоредиве са Боровим радијусом електрона у „кутији“, оне постају квантне.

ПРИМЕНА

Квантне тачке су данас највише изучаване полупроводничке наноструктуре. Захваљујући могућности да се њихове особине подешавају на контролисан начин, сваким даном је све више комерцијалних производа чија функционалност директно зависи од њих. Њихова примена обухвата области као што су медицина, биомедицина, дијагностика, катализа, козметика, телекомуникације, фотонапонске компоненте, фотодетектори, итд. Свакако најпознатији комерцијални производ који се директно заснива на функционалности квантних тачака јесте QLED телевизор, који је Самсунг избацио на тржиште 2017. QLED екрани састављени су од низова LED диода и филтера, који у облику танких филмова садрже квантне тачке. Оно што квантне тачке издваја од осталих емитера светлости јесте веома оштра резолуција боје коју емитују фотолуминисценцијом. Стога, само са променом њихове величине, веома једноставно се добијају изузетно квалитетни извори за три основне боје: црвену, зелену и плаву (енгл. RGB). Изузетна позадинска осветљеност коју пружа QLED телевизор такође је уско повезана са још једном Нобеловом наградом, овог пута за физику 2014, и проналаском енергетски ефикасних LED извора који емитују плаву светлост. Данас квантне тачке у QLED екранима управо конвертују плаву светлост у три основне боје, а комбинацијом њихове густине у филму и у сваку другу жељену нијансу. Сваке

године лабораторија у Берклију произведе 25 тона квантних тачака које пронађу свој пут у QLED екранима.

Квантне тачке полако проналазе своју комерцијалну примену у медицини. Због себи својствене луминисценције, уских емисионих линија, механичке и термичке стабилности, квантне тачке су идеалан кандидат који би могао да замени флуорофор маркер (до сада су коришћени органски молекули или протеини који могу да реемитују светлост) за биоснимање канцерогених ћелија у људском организму. У експерименталној фази, интензивно се испитују могућности повезивања квантних тачка са биокompatibilним молекулима, могућности снимања целокупних ћелија, или доставе лека до тачно одређеног објекта ткива у организму.

Енергетика је, највероватније, наредна област у којој се очекује значајан напредак услед примене квантних тачака. Њихов потенцијал је већ демонстриран применом у фотонапонским ћелијама са веома високом ефикасношћу конверзије енергије. Неке од соларних ћелија које су базиране на новим концептима конверзије енергије сунца управо користе квантне тачке или низове квантних тачака као медијум за апсорпцију светлости. Осим тога, квантне тачке су, додуше у експерименталној фази, показале огроман потенцијал за примену у процесирању квантних информација, у квантним компјутерима, блокчејн технологијама и квантној криптографији. Један од овогодишњих лауреата, Бавенди, управо тврди како: „Постоји доста интересовања за квантне материјале који би могли да се примене у квантним компјутерима, квантним комуникацијама, генерално свуда где је потребно манипулисати квантно механичким особинама насталим услед побуђивања у материјалима.“

„ВИНЧА“

Мало је познато да је Институт „Винча“ имао, без икаквог претеривања, пионирску улогу у открићу квантних тачака и њихових квантних особина. Само годину дана након открића Бруса и његових сарадника, Милица Ненадовић, Тијана Рајх, и Олга Мићић први пут су синтетизовале олово сулфидне (PbS) квантне тачке. Мерењима оптичке апсорпције и фотолуминисценције, недвосмислено су установиле да ове сићушне честице кубичног облика испољавају квантне ефекте. Разлика у таласним дужинама светлости које су оне апсорбовале и емитовале била је умерена за више од 100 nm, што је додатно указало на постојање квантног ефекта у сразмери са величином квантних тачака. Ништа мање значајно није ни откриће Јована Недељковића, годину дана касније, који је успоставио везу између

јонизујућих потенцијала и величине квантних тачака. Заједно са већ поменутих научницама, синтетизоване су квантне тачке са жива селенидом (HgSe), олово селенидом (PbSe) и кадмијум селенидом (CdSe) у колоидалном раствору. Први пут је показано да су хемијски потенцијали за реакције редукције и оксидације фотогенерисаним носиоцима наелектрисања у квантним тачкама драматично већи како се величина квантних тачака смањује. Тиме су још једном, недвосмислено, потврђени постојање квантних ефеката у квантним тачкама и њихов утицај на хемијске реакције. Хемијска реакција редукције угљен-диоксида, која је извршна као пример са CdSe квантним тачкама, и данас представља основни метод за редукцију CO₂ и његово хватање у процесима декарбонизације.

МОЈ ДОПРИНОС

Са квантним тачкама први пут сам се сусрео 2002. Већ тада је у Енглеској постојало велико интересовање за физику квантних тачака, а нарочито за њихову примену у оптоелектроници, као и за високо ефикасне соларне ћелије. Управо сам завршио истраживачки пројекат са *Infinion Technologies AG* (претходно *Siemens Semiconductors*) у вези са полупроводничким ласерима на квантним јамама, када су ми колеге са Универзитета у Шефилду скренуле пажњу на нове наноструктуре – квантне тачке. У неформалној дискусији су се распитивали да ли бих могао да извршим квантне прорачуне за њих? Сећам се како сам лаконски прихватио изазов, размишљајући у себи како нема ничег компликованог у преласку са једне на три димензије у квантном простору. Како сам само погрешно! Било ми је потребно три године рада у енглеској Националној лабораторији Даресбури, у којој су се у то време налазили неки од најмоћнијих суперкомпјутера на свету, да бих развио свој паралелни компјутерски код *kprw*. У то време, једино су суперкомпјутери могли да обезбеде довољно компјутерске снаге потребне за квантне прорачуне квантних тачака са више хиљада, а некада и милиона атома.

Мој допринос овој области огледа се највише у примени квантних тачака у енергетици, прецизније за високоефикасне соларне ћелије базиране на квантним наноструктурама. Неки од њих су: (1) квантни инжењеринг и израда прве соларне ћелије са „уметнутом зоном“, која је базирана на низовима индијум арсенидних (InAs) квантних тачака, ради повећавања апсорпције сунчеве светлости и повећања ефикасности конверзије њене енергије у електричну, у сарадњи са универзитетима у Токију и Кембриџу; (2) дизајн луминосцентних соларних концентратора са олово селенидним / олово сулфидним (PbSe/PbS) квантним тачкама у конфигурацији

„руских лутака“, које конвертују светлост сунчевог спектра широког дијапазона у уски спектар таласних дужина погодан за апсорбовање од стране соларних ћелија, у сарадњи са Израелским институтом за технологију, *Technion*, и (3) квантни дизајн и израда кадмијум селенидних / кадмијум телуридних (CdSe/CdTe) колоидалних квантних тачака у конфигурацији „руских лутака“ за соларне ћелије које раде на принципу генерације мноштва екситона, у сарадњи са Универзитетом у Манчестеру. Имао сам изузетну част да 2015. угостим и упознам Бавендија на симпозијуму о електролуминисценцији у квантним тачкама, који сам организовао у Грасмиру, на северу Енглеске, под покровитељством Краљевског друштва из Лондона.

И мада је врло вероватно да ће проћи извесно време пре него што квантне тачке потпуно остваре свој технолошки потенцијал, ове малене честице су већ оставиле дубоки траг на животе људи. Њихово откриће и развој јасно демонстрирају значај уложеног труда и времена које је потребно, пре него што се фундаментална знања из науке преточе у нешто конкретно што има утицај на наш свакодневни живот. Остварења у вези са квантним тачкама су донедавно, у нашим уверењима, била могућа једино уз богату машту.

Данас су она реалност. — (E)

Стијанко Томић је дипломирао, магистрирао и докторирао електроинжењерску на Универзитету у Београду. У Институту за нуклеарне науке „Винча“ запослио се 1993, где ради и данас. Након неколико година постдокторског усавршавања у ЦЕРН-у, Обједињеном институту за нуклеарна истраживања у Дубни, на универзитетима у Сарију и у Шефилду, од 2003. ради као водећи научник у STFC лабораторији у Даресбурију, где је био ангажован на развоју технологија паралелно програмирања. Од 2011. године ради као професор, шеф Катедре за физику, на Универзитету Салфорд, у Манчестеру. Области интересовања проф. Томића су полупроводничке наноструктуре, електроелектроника и физика чврстој материји. Био је председник Групе за полупроводничку физику Института за физику у Лондону, председник, блајаник и члан савета TMCs конференција при Институту за физику у Лондону, NUSOD конференција под покровитељством IEEE, и CECAM „Дајлас Харџи“ центара у Уједињеном Краљевству. Министарство за технологију Републике Србије именovalo га је 2003. за научног савешника, као једног од најмлађих савешника у Републици. Због својих достигнућа у науци, високом образовању и укључивању локалних заједница у науку, 2019. године је изабран за савешника Института за физику у Лондону.