

Kvantne pike

dr. Janez Strnad

Članek »Kvantne pike« Janeza Strnada je nadaljevanje članka »Delec v škatli« istega avtorja, ki je bil objavljen v reviji *Fizika v šoli* [letnik 23, št. 2, 2018] lani. Oba članka objavljamo z dovoljenjem uredništva revije *Kemija v šoli in družbi*, št. 1, 2015, kjer sta bila članka prvič objavljena.

Sistemi z manj dimenzijami

V fiziki že nekaj desetletij raziskujejo *sisteme z manj dimenzijami*. V teh sistemih omejuje gibanje elektronov na dve dimenziji, kar ustreza ravnini, na eno dimenzijo, kar ustreza premici, in na nobeno dimenzijo, kar ustreza točki. V prvem primeru nastane *kvantna plast*, v drugem *kvantna žica* in v tretjem *kvantna točka* (slika 1) [1]. Sisteme raziskujejo s prijemi *nanotehnologije*, ki seže od velikosti nanometra do nekaj sto nanometrov. (Nanometer, nm, je milijardina metra, 10^{-9} m, in milijonina milimetra, 10^{-6} mm.)

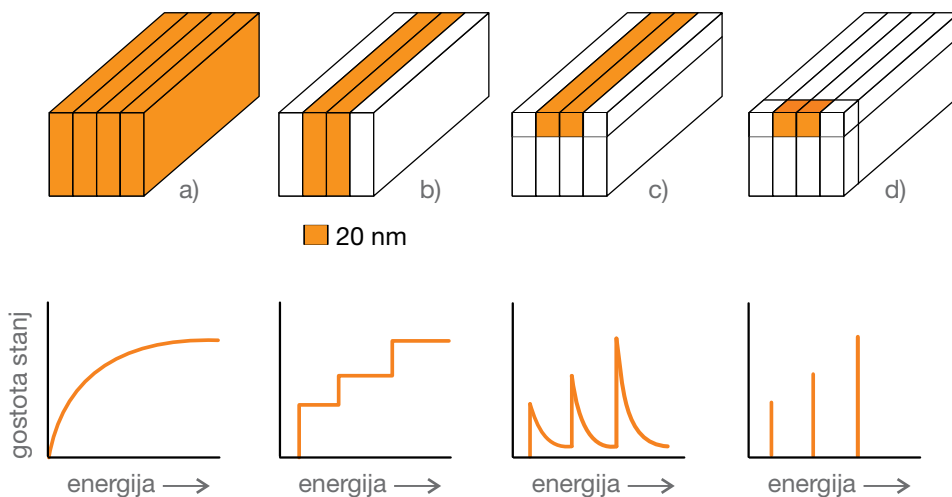
V kvantni plasti je gibanje elektronov omejeno na dve smeri. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, se ne morejo prosto gibati v tretji smeri, pravokotno na ravnino. V kvantni žici je gibanje elektronov omejeno na eno smer. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, se ne morejo prosto gibati v drugi in v tretji smeri, pravokotni na žico. V kvantni piki se elektroni ne morejo prosto gibati v nobeni od treh pravokotnih smeri. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, so *ujeti*. Najmanjše

razsežnosti kvantne plasti, kvantne žice ali kvantne točke v polprevodnikih ocenimo z desetimi nanometri, kar se razlikuje od pogleda v geometriji.

Pri raziskovanju elektronov v teh sistemih koristijo rezultati za elektrone v dolgih organskih molekulah, ki jih je približno mogoče opisati kot delce v škatli [2], [3]. Pomembno lastnost sistemov z manj dimenzijami pojasni Heisenbergova neenakačba:

$$\Delta x \Delta G > h. \quad (1)$$

Δx je nedoločenost koordinate in ΔG nedoločenost ustrezne komponente gibalne količine $G = mv_x$. Elektron, ujet v prostor z vse manjšimi razsežnostmi, ima vse natančnejše določeno lego. Zato je vse manj natančno določena njegova gibalna količina. S tem je povezana vse večja gibalna količina in z njo vse večja energija. Energija elektrona, ujetega v zelo majhno območje, je zelo velika. Vedenje elektronov v polprevodniku je sicer odvisno od vrste polprevodnika in od temperature. Iz načela (1) pa izhaja, da vedenje elektronov v sistemih z manj dimenzijami postane odvisno od velikosti območja, na katero so ujeti.



Slika 1: Shematična porazdelitev stanj po energiji v sistemih s tremi (a), z dvema (b), z eno (c) in z nič (d) dimenzijami [1].

Prve poskuse so naredili s kvantnimi plastmi. Kvantne plasti je mogoče izdelati z *epitaksijo z molekulskimi curki*. V visokem vakuumu pri tlaku preostalega plina, manjšem od 10^{-10} milibara, in pri nizki temperaturi na kristal usmerijo curek atomov izbrane sorodne vrste. Na kristalu se na vrhno plast atomov nalagajo nove plasti atomov, ki sledijo zgradbi nižje plasti. Kristal počasi raste s hitrostjo manj kot deset nanometrov na minuto. Po načrtu spreminjajo vrsto atomov, da dobijo plasti z želeno debelino, ki jo na obeh straneh obdajata za elektrone nedostopni območji. Kvantne plasti izdelajo tudi s *tehniko krovine, oksida in polprevodnika*. Površje ploščice iz silicija z določeno primesjo oksidirajo, da nastane tanka plast silicijevega dioksida kot izolatorja. Nanjo naparijo tanko plast silicija z izbranimi primesmi. Tako izdelujejo na primer tudi tranzistorje za mobilne telefone in sončne celice. Nazadnje naparijo ozke kovinske pasove, ki rabi- jo kot elektrode, s katerimi pri poskusih vplivajo na po- jave. S kvantnimi plastmi so naredili veliko poskusov in raziskovali pojave, ki jih pri polprevodnikih v kosu niso zasledili.

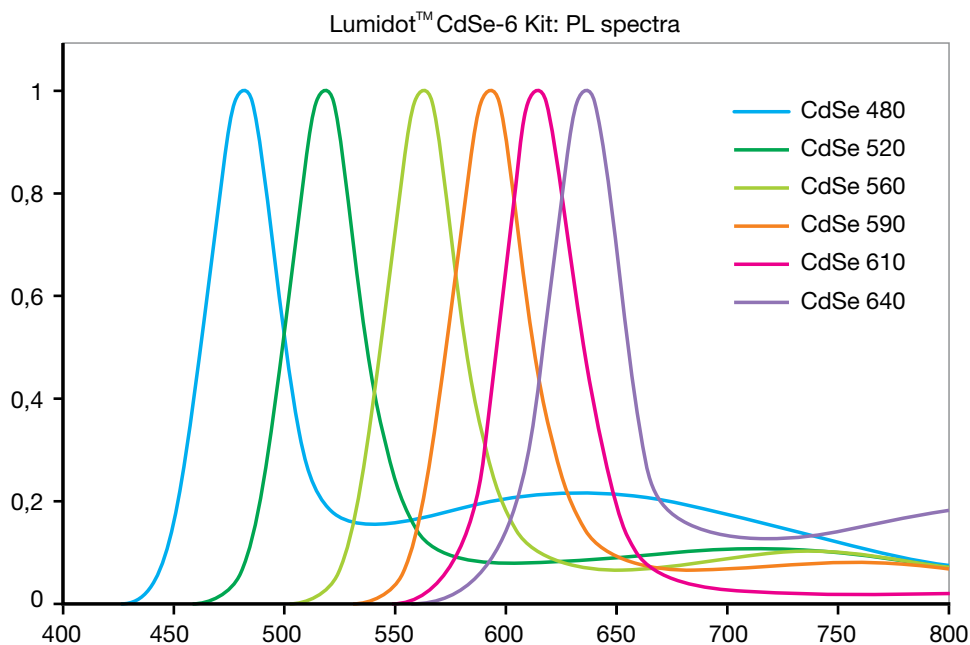
Samorastne kvantne pike

Aleksej I. Ekimov in A. A. Onuščenko sta na Fizikalno- tehničnem inštitutu v Sankt Peterburgu leta 1981 delala poskuse s silikatnimi stekli z majhno primesjo klorovih in bakrovih spojin. Opazovala sta spremembe v steklu pri različnih temperaturah v odvisnosti od časa. Ugo- tovila sta, da so v steklu zrastle zelo majhni *nanokristali* polprevodnika bakrovega klorida (CuCl). Kristali so ras-

li tem hitreje, čim višja je bila temperatura. Ker je bil bakrov klorid najprej tekoč, so nanokristali imeli obliko kroglic. Z rentgensko svetlobo sta zasledovala spremin- janje velikosti nanokristalov od nekaj nanometrov do ne- kaj deset nanometrov. Nanokristali so absorbirali svetlo- bo s tem manjšo valovno dolžino, čim manjši so bili. Pri fluorescenci so to svetlobo sevali na vse strani. Potem so namesto bakrovega klorida uporabili druge polprevod- niki, na primer kadmijev sulfid in kadmijev selenid. Pozneje so nanokristali, ki so nastali v množici sami od sebe, dobili ime *samorastne kvantne pike* (angl. *self-orga- nized quantum dots*) [4].

Louis E. Brus je s sodelavci v Bellovih laboratorijih leta 1984 dobil nanokristale po drugi poti. Iz raztopine spo- jine polprevodnika v topilu z dodatkom površinsko ak- tivne snovi so se pri povišani temperaturi nanokristali izločili kot *koloidna suspenzija*. V taki suspenziji so delci lebdeli v topilu. Z uravnavanjem okoliščin so pridobili nanokristale z velikostjo od poldruga nanometra do sto nanometrov in več. Velikosti nanokristalov se pri danem poskusu med seboj niso razlikovale za več kot 15 %. Tudi drugi so opazovali podobne pojave. S časom so se prepri- čali, da so elektroni v nanokristalih ujeti. Številna merjen- ja so pokazala, da ne glede na lastnost spojine absorbirajo svetlobo s tem manjšo valovno dolžino, čim manjše so. Ko jih obsevamo s kratkovalovno svetlobo, pride do fluo- rescence. Pri tem na vse strani sevajo svetlobo z valovno dolžino, ki jo najmočneje absorbirajo (slika 2).

Samorastne kvantne pike dobijo še na tretji način. Na podlagi z epitaksijo z molekulskimi curki ustvarijo nekaj



Slika 2: Absorpcijski koeficient svetlobe v odvisnosti od valovne dolžine za nanokristale kadmijevega sele- nida s tanko prevleko cinkovega sulfida za različne velikosti. Valovna dolžina pri najmočnejši absorpciji se z naraščajočo velikostjo premika k večji valovni dolžini.

atomov debelo plast. Nanjo usmerijo curek molekul z malo različno kristalno mrežo. Med prvotno tanko plastjo in novo plastjo nastanejo močne mehanske napetosti, zaradi katerih se nova plast mehurjasto izboči. Nastanejo otoki, ki nazadnje postanejo nanokristali v obliki krogelnih kopic.

Samorastne kvantne pike postanejo obstojnejše, če jih prevlečejo z zelo tanko plastjo varovalne snovi, na primer cinkovega sulfida (ZnS). Tako preprečijo, da bi se atomi na površju spojili z atomi snovi v okolici.

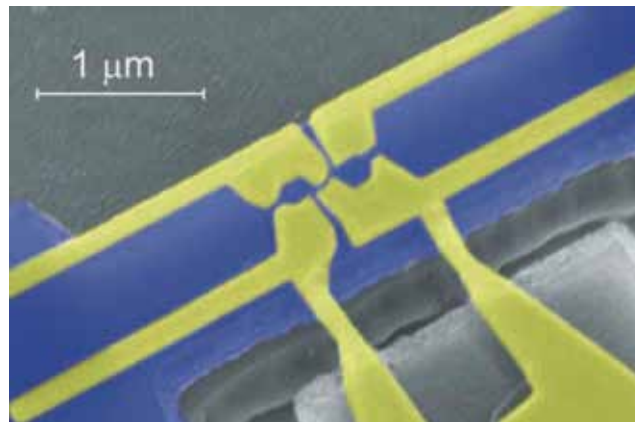
Samorastne kvantne pike izdelujejo industrijsko. Končni izdelek je prah ali suspenzija v tekočini (slika 3). Ugotovili so, da zelo majhne kvantne pike sevajo belo svetlobo, če jih osvetlijo s tako svetlobo. V pikah z nekaj deset atomi so skoraj vsi atomi na površju, in ti sevajo belo svetlobo. Z njimi bo mogoče izboljšati razsvetljavo.



Slika 3: Koloidne suspenzije nanokristalov kadmijevega selenida pri obsevanju s kratkovalovno svetlobo fluorescirajo v barvah, katerih valovna dolžina narašča z naraščajočo povprečno velikostjo od 2 do 7 nanometrov.

Samostojne kvantne pike

Mark A. Reed in njegovi sodelavci pri družbi Texas Instruments so leta 1987 delali drugačne poskuse [5]. Uporabili so *litografijo z elektronskim curkom*, ki so jo razvili za izdelavo polprevodniških elementov. Polprevodnik s plastmi zelenih primesi prevlečejo s tanko zaščitno plastjo. Z zelo tankim curkom elektronov na določenih mestih zaščitno plast odstranijo in tam naparijo plast kovine. (Namesto elektronskega curka je mogoče uporabiti tudi curek rentgenske svetlobe ali curek molekul.) Potem s topli odstranijo preostalo zaščitno plast. Postopek ponovijo, da nastane droben stebriček polprevodnika s plastmi z zelenimi lastnostmi (slika 4) [5]. Nazadnje naparijo ozke kovinske pasove, ki delujejo kot elektrode, s katerimi vplivajo na razmere. Leta 1988 je Reed uvedel ime kvantna pika. Pozneje so posamične kvantne pike, na katere je mogoče vplivati preko elektrod, poimenovali *samostojne kvantne pike* (angl. *free-standing quantum dots*). Z elektronskim curkom ne morejo izdelati tvorb, ki bi bile manjše od deset nanometrov. To pomeni, da samostojne kvantne pike ne morejo biti manjše od deset nanometrov. Samorastne kvantne pike so lahko manjše.



Slika 4: Samostojna kvantna pika. Do takih pik je mogoče speljati elektrode in nanje vplivati z električno napetostjo.

Zakaj polprevodnik?

Prve poskuse s samostojnimi kvantnimi pikami so delali z elementi druge in šeste skupine v periodnem sistemu, na primer s kadmijevim sulfidom (CdS) ali kadmijevim selenidom (CdSe). Nato so prešli h kvantnim pikam iz elementov tretje in pete skupine, na primer z galijevim arzenidom (GaAs). Tako so se tudi izognili uporabi strupenih kadmijevih spojin. Obstaja razlog, da so samostojne kvantne pike iz polprevodnikov. Ugotovimo ga, če se opremo na račun za vodikov atom [2].

Kot pripravno enoto za velikost smo pri vodikovem atomu dobili Bohrov polmer:

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{e^2m} = 0,0528 \text{ nm.} \quad (2)$$

Če bi elektron hoteli ujeti kot v vodikovem atomu, bi atom morali zapreti v votlino z velikostjo $2r_B \approx 0,1 \text{ nm}$. Z elektronsko litografijo pa ni mogoče dobiti razsežnosti, manjših od deset nanometrov, in ni mogoče izdelati manjših samostojnih kvantnih pik.

Elektron, ki se giblje okoli jedra v kristalu polprevodnika, moramo obravnavati drugače kot elektron v vodikovem atomu. Elektron se giblje med atomi po kristalu in ne po praznem prostoru. Povprečni vpliv atomov v kristalu na gibanje elektrona opišemo z dielektričnostjo ϵ , ki jo dodamo influenčni konstanti ϵ_0 . V enačbi (1) ϵ_0 nadomestimo z $\epsilon\epsilon_0$. V periodičnem polprevodniškem kristalu elektron lažje sledi električnemu polju kot v praznem prostoru. To opišemo z efektivno maso m^* , ki je precej manjša kot masa elektrona v praznem prostoru. V številnih polprevodnikih dielektričnost doseže velikostno stopnjo 10 in razmerje efektivne in proste mase m^*/m velikostno stopnjo 0,1. (Razmerje je na primer enako 0,14 v siliciju in 0,07 v galijevem arzenidu.) To pripelje do Bohrovega polmera v polprevodniku:

$$r_B^* = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0\hbar^2}{e^2m^*},$$

kar v našem primeru ocenimo s 5 nm. Ustrezni premer meri 10 nm, to je toliko, kolikor še zmorejo pri elektronski litografiji.

Uporaba kvantnih pik

Samorastne kvantne pike so vgradili v barvne zaslone s tekočimi kristali, sončne celice, sveteče diode in polprevodniške laserje ter s tem izboljšali njihovo delovanje. V medicini so s kvantnimi pikami nadomestili organska barvila, s katerimi so barvali biološke preparate. Kvantne pike oddajajo veliko več svetlobe kot barvila, ko jih osvetlijo, in so kemijsko odpornejše. Poleg tega jih je mogoče vgraditi v žive celice, jih osvetliti in po fluorescentni svetlobi slediti celici. Raziskujejo možnosti, da bi na ta način zasledovali skupine molekul in dosegli, da se nanokristali naberejo v bolnem delu telesa.

Danes raziskujejo kvantne pike v številnih laboratorijih po vsem svetu. S samostojnimi kvantnimi pikami, na katere je mogoče vplivati z zunanjo napetostjo in ki jih med seboj povezujejo, si obetajo izboljšati delovanje računalnikov. Kvantne pike izkoriščajo v elektroniki in optiki. Z njimi so naredili tranzistor z enim samim elektronom. S spreminjanjem napetosti na elektrodah je mogoče dodajati elektrone in s tem raziskovati »umetne atome« [6]. Kvantne pike je mogoče urediti v mrežo in raziskovati »umetne kristale«. Vse to odpira številne nove možnosti za poskuse v kvantni mehaniki, ki so jih prej obravnavale le računske naloge v učbenikih. M. Reed je zapisal: »Možnost, vplivati na snov v merilu atomov in po premišljenem načrtu ustvariti edinstvene materiale in naprave, je na splošno privlačna. Kaže na moč človeške bistrumnosti in domišljije nad pravili, po katerih nastanejo materiali v naravi.« [5]

Literatura

- [1] E. Corcoran (1990). Trends in materials: diminishing dimensions, *Scientific American* 263 (5) 74–83.
- [2] J. Strnad (2015). Delec v škatli. *Kemija v šoli in družbi* [elektronski vir], št. 1.
<https://kemija.net/stevilke/217>.
- J. Strnad (2018). Delec v škatli. *Fizika v šoli*, 23(2), 2–7.
- [3] T. Kippenry, L. A. Swafford, S. J. Rosenthal (2002). A powerful visual aid for introducing the particle in a box, *Journal of Chemical Education* 79, 1094–1100.
- [4] M. G. Lagally (1998). Self-organized quantum dots. *Journal of Chemical Education* 75, 277–279.
- [5] M. A. Reed (1993). Quantum dots, *Scientific American*, 98–103 (1).
- [6] M. A. Kastner (1993). Artificial atoms, *Physics Today*, 24–31.