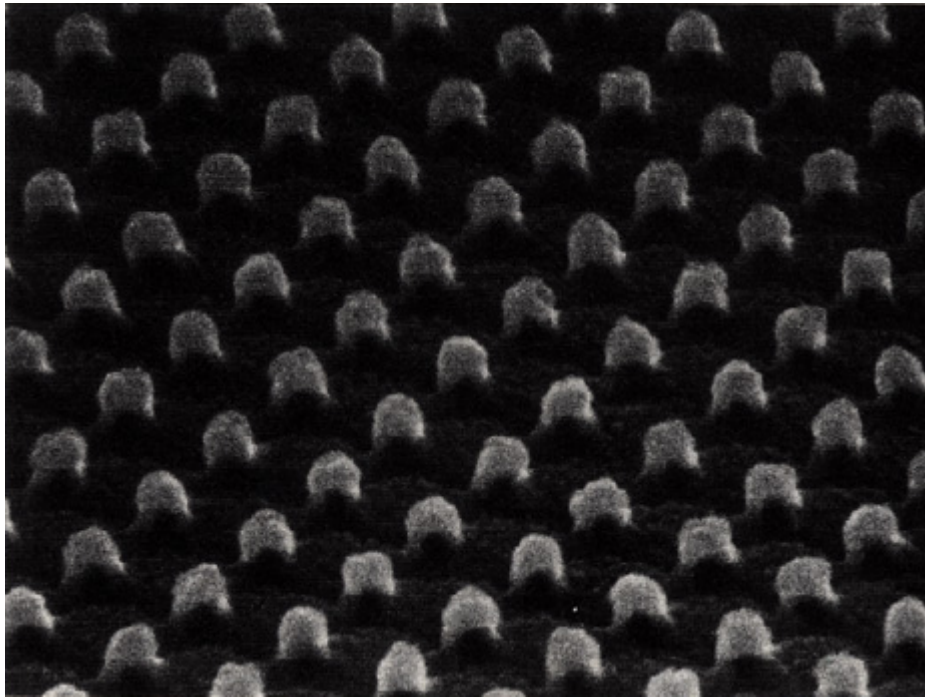


Kvantne pike

Seminar



Mentorja:

prof. dr. Robert Blinc

prof. dr. Anton Ramšak

Avtor:

Anton Potočnik

3. letnik Fizike,
naravoslovna smer

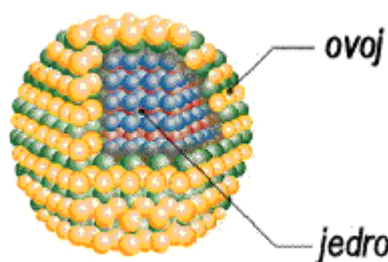
Marec 2006

Povzetek

Z manjšanjem dimenzij objektov se v njih vedno bolj odraža kvantna narava. Posebej zanimivi so izredno majhni kristalčki polprevodnikov, obdani s tanko plastjo snovi z večjo energijsko špranjo tako imenovane kvantne pike. Večkrat jih imenujemo tudi umetni atomi, saj zaradi kvantnih efektov opazimo diskretna stanja energije elektronov. Zanimivi pa so predvsem zato, ker lahko z velikostjo vplivamo na razmik med stanji. V industriji so se kvantne pike že zelo razširile. Na primer modri laserji v DVD enotah, nadomestek organskih barvil za markiranje objektov v bioloških vzorcih, v bodoče pa bomo z njimi morda naredili velike kapacitete pomnilnika, vire bele svetlobe, fotocelice z ogromnim izkoristkom ali pa celo kvantne računalnike.

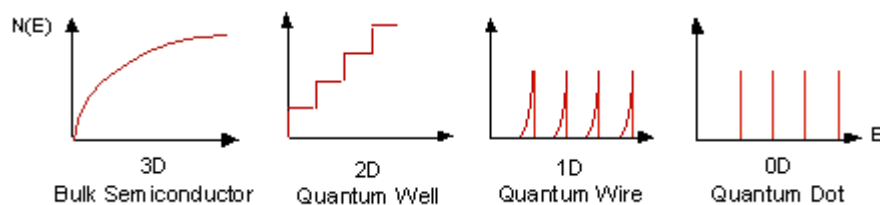
Uvod

Kvantne pike so zelo majhni kristali ponavadi polprevodnega materiala obdani s plastjo drugega materiala z večjo energijsko režo. Ker so tako majhne se obnašajo kot potencialne jame, ki zadržujejo elektrone na razdalji nekaj de Broglie-vih valovnih dolžin, zaradi česar prevladajo kvantne lastnosti.



Slika 1: Shematski prikaz kvantne pike

Če primerjamo elektrone v kvantni piki z elektroni na stiku dveh polprevodnikov, kjer se lahko prosto gibajo v stični ravnini (2D EG) ali z elektroni kvantne žice, kjer se lahko prosto gibajo v eni dimenziji (1D EG), pravimo, da je v kvantni piki *nič dimenzionalen elektronski plin* (0D EG). Snovem, ki so iz različnih materialov (kvantne pike so iz jedra in ovoja) pa pravimo tudi *heterostrukture*.



Slika 2: Gostota elektronskih stanj kot funkcija razsežnost strukture

Velikosti kvantnih pik so nekaj 10 nm z nekaj 100 atomi. Zaradi tako majhnih razsežnostih se energijska stanja elektronov dovolj razširijo, da ne govorimo več o energijskih pasovih, temveč o *diskretnih* energijskih stanjih. Takšne kvantne lastnosti poznamo v atomih, zato imenujejo kvantne pike tudi *umetni atomi*.

Najlepša lastnost teh nanokristalov pa je ta, da jim lahko enostavno spreminjamo velikost in obliko ter s tem poljubno nastavimo razmik med energijskimi stanji ter posledično emisijske oziroma absorpcijske spektre. Z dodajanjem elektronov lahko simuliramo naravne atome, s povezavo kvantnih pik s kvantno žico, pa dobimo molekulo z zanimivimi lastnostmi, ki nas bodo nekega dne morda pripeljali do kvantnega računalnika ali še kaj več.

Lastnosti

Landauerjeva formula

Kvantne pike imajo zanimive prevodniške lastnosti. Če jih pogledamo od daleč, jih lahko poenostavimo z zelo ozko potencialno bariero. Da bi izračunali prevodnost takšnega sistema predpostavimo, da je temperatura blizu absolutne ničle, na kvantno piko pa smo pritrdili dve elektrodi. Zaradi nizke temperature bodo prevajali le elektroni v bližini fermijeve energije oz. v energijskem razponu $\mu_L > E > \mu_D$, kjer sta μ_L in μ_D elektrokemijska potenciala na levem in desnem koncu kvantne pike

$$\mu_L = E_F + eV/2,$$

$$\mu_D = E_F - eV/2,$$

kjer je E_F fermijeva energija, V pa napetost med elektrodama. Če predpostavimo, da se elektroni na stiku elektrode in kvantne pike ne odbijajo, zapišemo gostoto toka v kvantno piko kot produkt osnovnega naboja, gostote in hitrosti. Gostota v enodimenzionalnem primeru je $1/L$. Tok v kvantno piko zapišemo kot

$$I_L = \frac{e}{L} \sum_k T(E) \cdot v \cdot f(E - \mu_L) = \frac{e}{L} \sum_k T(E) \cdot \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} \cdot f(E - \mu_L),$$

kjer je $f(E)$ fermijeva porazdelitev, $T(E)$ verjetnost za prehod, hitrost pa smo zamenjali z odvodom energije po gibalni količini. Sedaj pretvorimo vsoto po vseh možnih gibalnih načinih v integral, saj se elektroni v vzdolžni smeri obnašajo kot prosti - gibajo se na mnogo načinov (in ni odbojev), ter upoštevajmo degeneracijo zaradi spina

$$\sum_k \rightarrow 2 \frac{L}{2\pi} \int dk.$$

Podobno velja za tok iz desne strani, le pri potencialu μ_D . Razlika levega in desnega toka je tok, ki teče skozi kvantno piko. Temu zapisu pravimo tudi Landauerjeva formula

$$I = I_L - I_D = \int_0^\infty T(E) [f(E - \mu_L) - f(E - \mu_D)] dE.$$

Pri nizkih temperaturah predpostavimo, da je fermijeva porazdelitev stopničasta funkcija in izraz se poenostavi v

$$I = \frac{2e}{h} \int_{\mu_D}^{\mu_L} T(E) dE.$$

Če je napetost dovolj majhna da se $T(E)$ malo spreminja na intervalu od μ_L do μ_D , dobimo linearno odvisnost med tokom in napetostjo

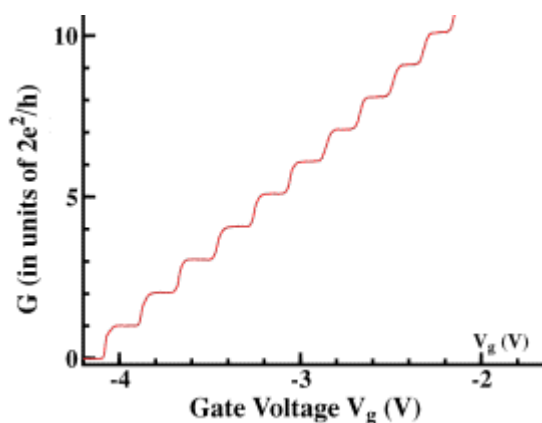
$$I = \frac{2e^2}{h} T(E_F) \cdot V, \text{ kjer je } V = \frac{\mu_L - \mu_D}{e},$$

Prevodnost zapišemo kot tok deljen z napetostjo

$$G = \frac{I}{V} = \frac{2e^2}{h} T(E_F).$$

Količina $2e^2/h$ se imenuje *kvant prevodnosti*. To je tudi prevodnost idealne enodimenzionalne kvantne žice.

Rekli smo, da lahko obravnavamo elektrone v vzdolžni smeri kot proste, to pa ne velja za prečno smer. V prečni smeri elektrone obravnavamo kot vpete valove z diskretnimi energijskimi stanji. Z dodatno napetostjo v prečni smeri povečamo število valovanj. Vsako dodatno valovanje pa prispeva svoj kvant prevodnosti v vzdolžni smeri, zato dobimo stopničast graf prevodnosti kot funkcije pravokotne napetost.



Slika 3: Prevodnost kot funkcija napetosti pravokotno na tok

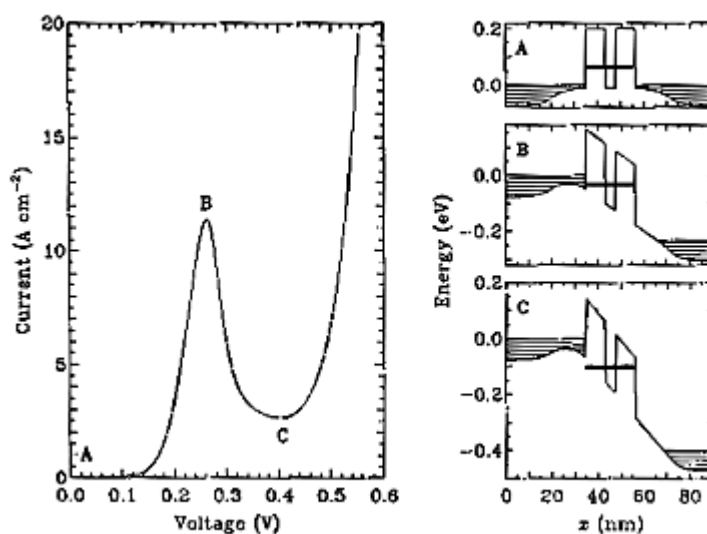
Koherentno resonančno in enoelektronsko tuneliranje

Če kvantno piko pogledamo podrobneje vidimo, da imamo blizu skupaj dve in ne samo eno potencialno bariero. Če sta blizu le majhen del de Broglie-jeve valovne dolžine za elektron (nekaj *nm*), opazimo dva pojava: resonančno tuneliranje, ki je posledica valovne narave elektronov in pa enoelektronsko tuneliranje, ki je pa posledica kvantizacije elektronov. Drugi pojav opazimo tudi pri nekoliko večji oddaljenosti barier, dokler je kapaciteta dovolj majhna, da je elektrostatska energija enega elektrona ($e^2/2C$) večja od kT . Ta pojav ne bi opazili, če naboj ne bi bil kvantiziran.

Koherentno resonančno tuneliranje

Da bi razumeli tok-napetost odvisnost za resonančno tuneliranje, vzemimo prostor med dvema barierama kot kvantno škatlo. Vemo, da ima taka škatla diskretne energijske nivoje, ki

se širijo, če manjšamo velikost. Predpostavimo tako majhno škatlo, da je v njej dovoljeno samo eno stanje z energijo E_r . Škatla sedaj deluje kot filter, ki prepušča samo elektrone z energijo E_r , če takih elektronov ni, tok ne teče (Slika 4.a). Ko dodamo zunanjo napetost se E_r ustrezno zmanjša glede na vhodne elektrone, in če je E_r sedaj enaka energiji elektronov, tok teče (Slika 4.b). Ko pa je zunanja napetost tako velika, da E_r pade pod prevodni pas vhodnih elektronov, tok ostro pade (Slika 4.c). V tem območju (od b do c) opazimo negativni diferencialni upor, kar pogosto uporabljajo pri hitrih stikalih in visokofrekvenčnih oscilatorjih. Pri resnih računih bi morali upoštevati še razmazanost naboja v sistemu.



Slika 4: Karakteristika resonant tunneling diode

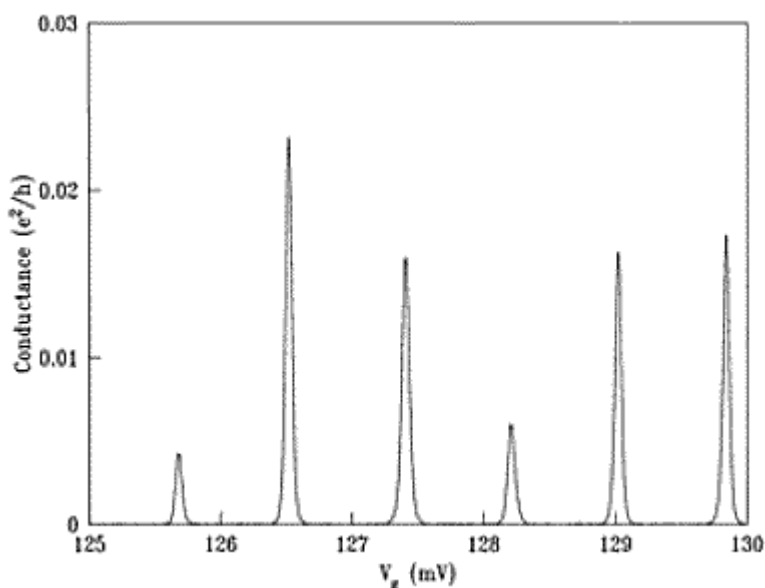
Enoelektronsko tuneliranje

Ta pojav je posledica kvantizacije naboja oz. elektronov. Najprej predpostavimo, da so energijske reže znotraj kvantne pike dosti bolj narazen, kot pa je energija termičnih fluktuacij (kT). Predpostaviti pa še moramo, da elektron, ki se je ulovil v kvantni pike zlahka ne uide (ne postane delokaliziran), mora biti prevodnost skozi potencialni barieri mnogo manjša od kvanta prevodnosti. Na kvantno piko smo še pritrdili dve elektrodi in pravokotno na ti dve, še tretjo, imenovano tudi *gate* elektrodo.

Takšen sistem ne prevaja električnega toka, saj elektroni nimajo dovolj energije, da bi prišli v kvantno piko, saj so vsa stanja z nižjo energijo že zasedena. Kvantna pika sedaj vsebuje N elektronov. Z dodano napetostjo na gate elektrodi energijska stana znižamo tako, da ima naslednje prosto energijsko stanje ravno toliko energije, kot jo imajo elektroni v ostalih dveh elektrodah. V tem primeru pa posamezen elektron lahko tunelira v ali iz pike. Če dodamo na ti dve elektrodi dovolj majhno zunanjo napetost, bo elektron najprej tuneliral v

kvantno piko, število elektronov se bo povečalo na $N+1$, nato pa bo tuneliral ven, na elektrodo z nižjim potencialom. Tako bo v piki ponovno N elektronov in zgodba se bo ponovila. Število elektronov bo v piki nihalo med N in $N+1$ hkrati pa bo skozi tekkel tok. Če sedaj napetost na gate še povečamo, se bodo energijska stanja še spustila, prosto stanje se bo zapolnilo, naslednje pa bo previsoko, da bi elektroni lahko tunelirali, zato se tok ustavi.

Sedaj smo v podobni situaciji kot na začetku, le da je v kvanti piki tokrat $N+1$ elektronov. V tem trenutku lahko napetost na gate še povečujemo in opazimo oscilacije toka v odvisnosti od gate napetosti, kar lepo prikazuje spodnja slika.



Slika 5: Prevodnost SET kot funkcija gate napetosti.

Razmik med vrhovi je potrebna napetost da dodamo en elektron.

Izdelava

Kvantne pike so v osnovi koščki snovi obdane z drugo snovjo z večjo energijsko režo. To lahko naredimo z vrsto metod. Vsaka metoda ima svoje prednosti in slabosti ter svojo »obliko« kvantnih pik. Te so lahko na primer ločene in raztopljene v nekem tekočem mediju, ali pa močno pritrjene in naključno ali urejeno razporejene po tanki površini.

Metod izdelave je veliko, pogledali pa si bomo tri: epitaxy, koloidno sintezo in elektronsko litografijo.

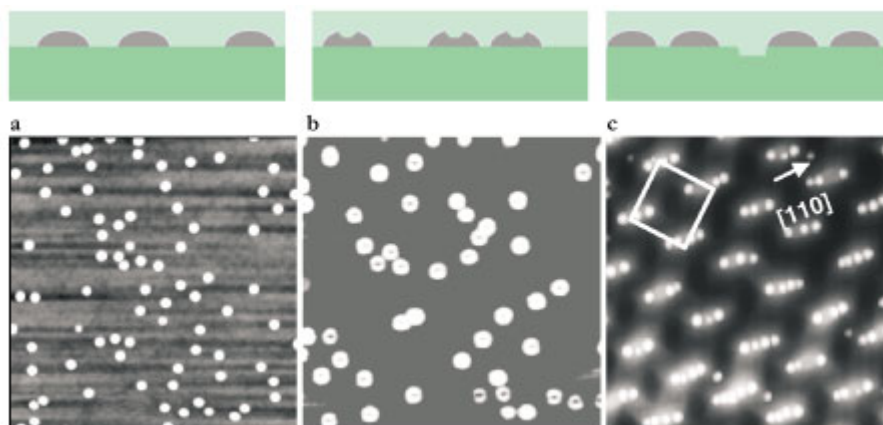
Epitaxy

To je metoda odlaganja atomov na podlago z natančnostjo skoraj eno atomskih plasti. Za Podlago – substrat ponavadi izberemo *GaAs*, ki smo ga prej s to metodo naložili na drug

polprevodnik. Tej metodi se reče tudi *Molecular beam epitaxy* in se izvaja pri zelo nizkem tlakom z ultra čistimi snovmi. Substrat (*GaAs*) segrejejo na nekaj $100K$ in počasi nanj spustijo atome (*In*, *Ga*, *As*), ki na površini tvorijo drugačen polprevodnik, z manjšo energijsko režo. Nekaj atomov debela plast novega polprevodnika se čisto prilega substratu, ker pa želimo narediti kvantne pike in ne plasti, smo izbrali takšen polprevodnik, da je mrežna dimenzija malo drugačna od substratove. Pojavijo se površinske sile, ki minimizirajo elastično, površinsko energijo, tako da se tvorijo majhni otoki. Ves kar nam še ostane je, da pokrijemo te otoke s plastjo *GaAs* – substrata, in kvante pike so narejene.

Metoda ima en večji problem in to je relativno slaba kontrola velikosti in oblike kvantnih pik. Vendar je zelo uporabna in kaže, da se bo v prihodnje še veliko uporabljala.

S spreminjanjem pogojev lahko naredimo tudi prstanom podobne oblike – kvantne prstane. Ti se od kvantnih pik ne razlikujejo veliko. Razliko pa opazimo šele, ko dodamo zunanje magnetno polje ($8T$). Takrat se energijska stanja še dodatno ločijo, kar zna priti marsikje prav.



Slika 6: AFM slike otokov epitaksično zrasle na GaAs substratu.

(a) Naključno razporejene kvantne pike. (b) Naključno razporejeni kvantni prstani.

(c) Mrežno razporejene kvantne pike.

Koloidna sinteza

Koloidne kvantne pike se uporabljajo predvsem kot fluorescentna barvila za označevanje struktur v celici. Barva, ki jih izsevajo je funkcija velikosti. Večje kot so, bolj je izsevana svetloba rdeča, manjše kot so, pa modra. Sintetiziramo jih preprosto iz raztopin ali drugih materialov - polimerov. Tipične koloidne kvantne pike so iz *CdSe*, *CdS*. Včasih jim obdamo še s t.i. kapo, da so bolj odporne in jih lahko pritrdimo na želene molekule. Od ostalih so

koloidne kvanten pike bolj odporne, manj strupene in raztopljene v polarnih topilih, kar je idealno za uporabo v bioloških vzorcih.

Še ena zanimiva lastnost koloidnih kvantnih pik je *linearno polarizirana* emisijska svetloba. To lahko razložimo, če je kvantna pika nekoliko raztegnjena oz. podolgovata. Ugotovili so, da je razmerje širine in dolžine takšne pike povezana s polarizacijo izsevane svetlobe. Kaže, da je ta lastnost zelo zaželeno pri mnogih aplikacijah.



Slika 7: Fluorescenca, ki jo dobimo z UV osvetlitvijo *CdSe* kvantnih pik.

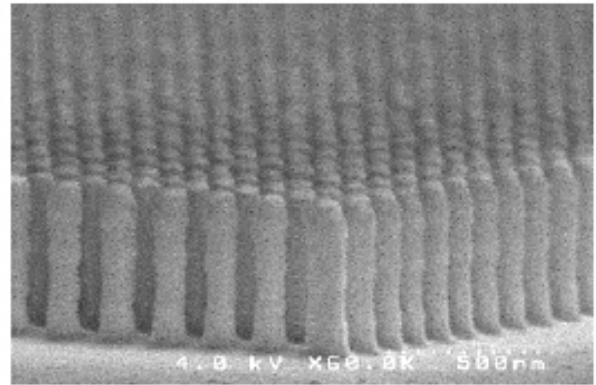
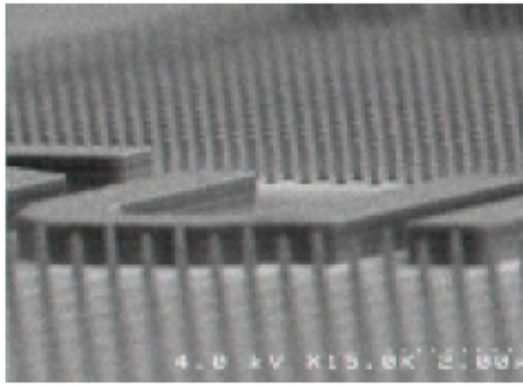
Elektronska Litografija

Z metodo elektronske litografije ali electron beam lithography z curkom elektronov »rišemo« mesta na materialu z natančnostjo do nekaj *nm*. Obsevan material, ki smo ga prej premazali z optično občutljivo snovjo lahko nato jedkamo ali pa nanj naneseemo nov material, ki se bo pripel samo na obsevana ali ne obsevana mesta, odvisno od premaza. Na ta način izdelujejo strukture kot so nano mreže, krožne mikro resonatorje in nanostebrički (nanopillars). Ti pa se že obnašajo kot kvante pike. Njihov premer je 20 nm, kažejo pa fotoluminiscentne lastnosti kot ostale, drugače narejene kvantne pike.

Elektronska litografija je zelo počasna. Žarek mora preiti celotno površino serijsko, kar je v primerjavi s svetlobno litografijo, kjer posvetimo skozi masko, precej počasneje. Če imamo več plasti, moramo čakati tudi par ur, da je vzorec končan.

Resolucija elektronske litografije je odvisna od valovne dolžine elektronov v žarku. Ker je po de Broglie-ju ta obratno sorazmerna gibalni količini elektronov, povečamo hitrost in resolucija je boljša. Izkaže se, da pri večjih hitrostih oz. energijah pogosteje nastajajo sekundarni elektroni, ki se ne gibljejo kot bi želeli, še večji problem pa so elektroni, ki prodrejo skozi optično občutljivo plast in poškodujejo substrat.

Kljub mnogim problemom je elektronska litografija pomembna metoda pri izdelavi nano struktur, ker imamo skoraj popoln nadzor nad odliko, številom in pozicijo kvantnih pik.



Slika 8: InAs/GaSb super mreža nano stebričkov

Uporaba

Zaradi majhne velikosti imajo kvantne pike posebej zanimive in neobičajne električne in optične lastnosti. Diskretna energijska stanja smo do sedaj poznali samo pri atomih oz. molekulah. Ker jih nismo znali ločiti med seboj, smo opazovali velik sistem delcev, ki je imel energijska stanja tako blizu skupaj, da smo predpostavili zveznost stanj. S kvantnimi pikami in drugimi nanostrukturami pa se je to spremenilo. Ne samo, da lahko sedaj te kvantne lastnosti uporabljamo, znamo jih tudi spreminjati in prilagajati našim željam. Zaradi tega so si kvante pike hitro utrle pot v industrijo in danes je že kar nekaj podjetij, ki jih proizvajajo po naročilu kupcev. Uporabljajo jih kot biosenzorje v biologiji in medicini, za modre laserje v DVD enotah, v prihodnosti pa jih bomo morda srečali v kvantih računalnikih in še kje, kar si danes ne moremo niti predstavljati.

Enoelektronski tranzistorji

Danes najbolj uporabljeni tranzistorji so MOSFET, katerih je v mikroprocesorju že več milijonov. Vsako leto se število tranzistorjev v procesorjih poveča, s tem pa se mora velikost tranzistorjev zmanjšati. Vprašanje je, kako dolgo še lahko zmanjšujemo tranzistorje, ne da bi s tem pokvarili njihovo delovanje. Vemo namreč, da pri majhnih dimenzijah kvantni vpliv ni več zanemarljiv, MOSFET-i pa delujejo skoraj povsem klasično. Ideja je, da naredimo majhen tranzistor velikosti par atomov, ki bo izkoriščal kvante lastnosti.

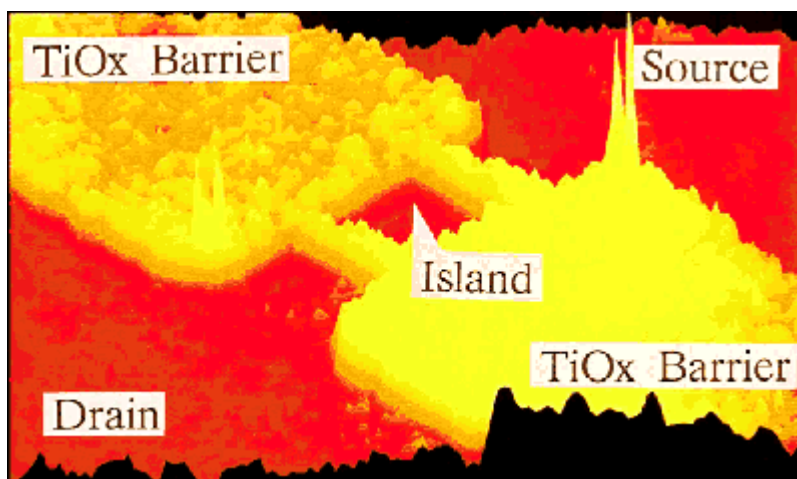
Že leta 1985 so predstavili teorijo o enoelektronskem tranzistorju ali single electron transistor (SET) in ga par let kasneje uspešno naredili. Danes jih ločimo na dva tipa: kovinske in polprevodniške.

Pri kovinskih imamo na sredini otok kovine, ki je ponavadi ločen od elektrod z bariero kovinskega oksida skozi katero *tunelirajo* elektroni, pravokotno pa je preko kondenzatorja povezana elektroda *gate*.

Pri polprevodniškem SET pa je podobno kot prej kvantna pika povezana z elektrodama *source* in *drain*, ter pravokotno na njiju še z elektrodo *gate*, bariero pa predstavlja ovoj kvantne pike, ki je iz materiala s širšo energijsko špranjo.

Na splošno je delovanje podobno kot pri FET tranzistorjih. Na tok skozi *source* in *drain* vplivamo z napetostjo na elektrodi *gate*.

Za bolj podroben opis recimo, da je na levi strani fermijeva energija enaka $E_{FL} = E_{F0} + e_0 \Delta V$, kjer je ΔV napetost med elektrodama *source* ter *drain*, na desni pa je $E_{FD} = E_{F0}$. V kvantnih pikah vemo, da so energijska stanja diskretna, torej lahko pride noter samo elektron s točno določeno energijo. Energijo diskretnih stanj pa lahko nastavljamo z napetostjo na elektrodi *gate*. Če nastavimo pravo napetost, bo skozi kvantno piko tekel tok elektronov, sicer pa ne. Odvisnost toka od *gate* napetosti so približno delta funkcije, ki smo jih razložili v poglavju o enoelektronskem tuneliranju. Ker je strmina delta funkcij zelo velika, lahko na ta način zelo natančno merimo naboj na *gate* elektrodi, kar je še ena pogosto uporabljena aplikacija SET.



Slika 9: AFM slika enoelektronskega tranzistorja narejenega s »scanning tunneling microscope nano-oxidation« procesom

Če želimo, da bo tak tranzistor deloval pri sobni temperaturi, morajo biti energijska stanja dovolj narazen v primerjavi s termičnimi fluktuacijami (kT), kar pomeni, da mora biti velikosti pod 10 nm . Ne dolgo nazaj so naredili tako majhen enoelektronski tranzistor

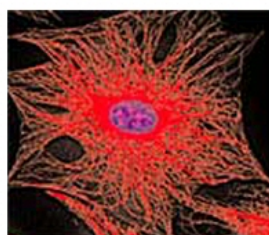
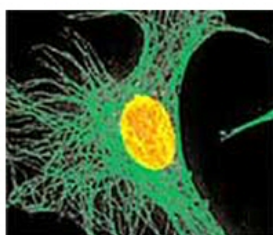
kovinskega tipa, ki je deloval pri sobni temperaturi, skozenj pa je tekel izredno majhen tok, tako da ni bil uporaben za povezovanje z drugimi oz. za izdelavo integriranega vezja.

Razvijalci pa imajo še en problem. Vsak tako izdelan enoelektronski tranzistor ima zaradi raznih fluktuacij pri izdelavi drugačen offset, kar si v integriranih vezjih ne morejo privoščiti.

Do procesorjev z enoelektronskimi tranzistorji je še dolga pot. Če jim tako ne bo uspelo je še nekaj drugačnih možnosti, kot so molekularni tranzistorji. Gotovo pa se bo industrija slej ko prej približala kvantni limiti in takrat bodo kvantne lastnosti elektronov odločno vplivale na zgradbo elektronskih komponent.

Biosenzorji

Uporabljajo se za detektiranje ali označevanje raznih struktur v celicah ali drugih bioloških vzorcih. Danes uporabljeni fluorescentni biosenzorji bazirajo na organskih barvilih. Ta barvila svetijo, če so prisotni na primer kakšni nevarni osebki ali molekule. Problem je, da takšna barvila svetijo v širokem spektralnem območju, kar zmanjša število barv, ki jih lahko razločimo in posledično uporabimo, povrh vsega pa takšne barve niso dovolj odporne in hitro razpadejo. Ustrezno narejene kvantne pike, pa s tem nimajo problemov. Njihov emisijski spekter je zelo ozek, torej sevajo z dobro določeno valovno dolžino. Valovno dolžino sami izbiramo v širokem območju, zato lahko hkrati opazujemo veliko različnih objektov, kar prej ni bilo mogoče. V nasprotju z organskimi barvili so kvantne pike tudi dolgo obstojne in poljubno malo strupene. Vzorec najprej obsvetimo z UV svetlobo, nato pa zaradi fluorescentnih lastnosti kvantne svetijo v izbrani barvi, ki je funkcija velikosti. Tudi izsevana svetloba je močnejša od izsevane svetlobe organskih barvil, zato so kvantne pike idealni biosenzorji.



Slika 10: Na desni so mikrotubuli pobarvani s 605nm – fluorescentnimi kvantnimi pikami, jedro pa z »Hoechst« modro barvo. Na levi pa so mikrotubuli in jedro označeni z rdečimi in zelenimi zmešanimi kvantnimi pikami.

Običajno kot biosenzorje uporabljamo koloidne kvantne pike, ker jih lahko naredimo izredno podobne po velikosti, zaradi česar je njihov emisijski spekter tako oster. Lahko jih

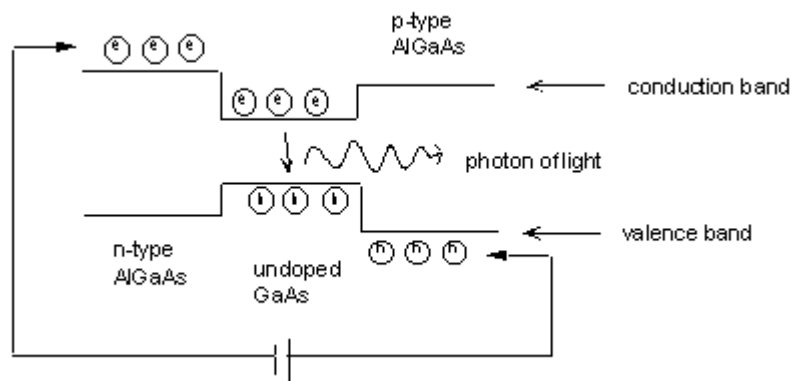
obdamo s kakšnim proteinom ali drugo večjo molekulo, s čimer dosežemo, da so boljše topni v polarnih topilih, manj strupeni ter lažje pripnemo objektom, ki jih želimo opazovati.

QD laserji

Polprevodniški laserji igrajo pomembno vlogo pri mnogih široko uporabljenih tehnoloških produktih, kot so CD, DVD enote in laserski tiskalniki, v prihodnje pa bodo verjetno odločilni pri izdelavi optičnih telekomunikacijah. Osnova delovanja laserja je ustvariti neravnovesne elektrone ter vrzeli in jih sklopiti z optičnim poljem, kar bo stimuliralo emisijsko sevanje. Že v sedemdesetih letih so izračunali, da bi imel laser, ki bi uporabljal *kvantne jame*, torej diskretna energijska stanja, veliko boljše lastnosti kot dotedanji makroskopski laserji.

Deset let kasneje so za laserje, ki bi izkoriščali *kvantne pike* napovedali še boljše lastnosti. Boljša temperaturna stabilnost in boljše ojačanje.

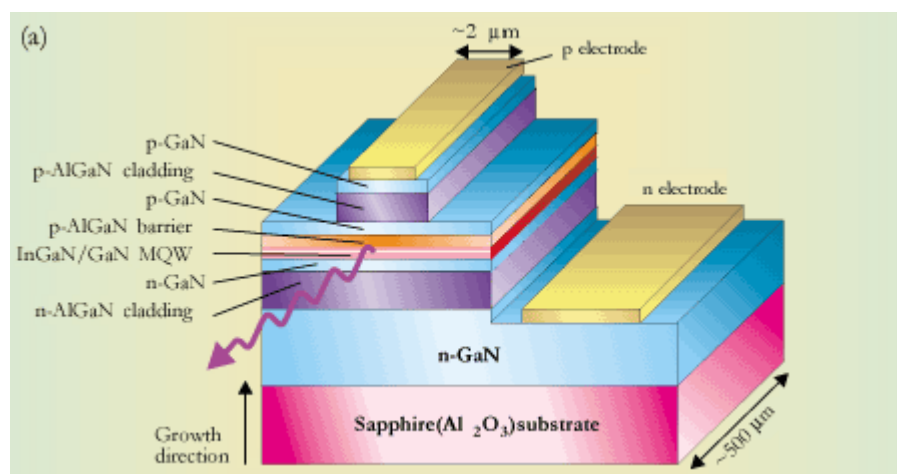
Stimulirana rekombinacija elektronov in vrzeli se zgodi v jedru kvantne pike, ker se tam ojači interakcija med nosilci naboja in sevanjem. Laserje, ki so jih naredili z *GaAs* in *InGaAs* imajo valovne dolžino okrog *900 nm*, novejše izvedbe pa uporabljajo heterostrukture na osnovi *GaN* in dosegaajo valovne dolžine okrog *400 nm*, kar je že v modrem delu spektra.



Slika 11: Shema polprevodniškega laserja

Ker je v laserju veliko kvantnih pik, je kvaliteta žarka je zelo odvisna od njihove podobnosti. Če bi bile vse pike enako velike, bi dobili laserski žarek z zelo natančno valovna dolžino, ker pa so posamezne pike po velikosti malenkost drugačne, je ta natančnost malo manjša. To je odvisno predvsem od načina izdelave, zato se v zadnjem času bolj uporabljajo koloidne kvantne pike, ker jim lahko obliko in velikost nastavimo bolj natančno kot katerim drugim.

Laserji s kvantnimi pikami so zelo kvalitetni laserji z kratko valovno dolžino, kar omogoča nove tehnologije in tehnološke postopke. Ti bodo v prihodnosti verjetno še bolj pomembni, zato se bo razvoj in izpopolnjevanje takih laserjev nadaljevalo še dolgo.



Slika 12: Shema modrega diodnega laserja z več kvantnimi jamami

Ostalo

Na podoben način, kot smo naredili QD laserje, lahko naredimo tudi LED diode oz. QLED. Barva LED diode je odvisna od razmikov med elektronskimi stanji, kar je funkcija velikosti kvantne pike, ki pa jo lahko poljubno nastavljamo med proizvodnjo. Takšne prilagodljivosti pri navadnih LED diodah nimamo. Energijske špranje in oblika sta skoraj predpisani. QLED nimajo takih predpisov. Lahko jih damo v različne materiale kot so plastika ali barve, s čimer se uporabljivost bistveno poveča. V zadnjem času pa se pogosto govori tudi o belih QLED diodah. Bile bi naj zelo svetle in imele zelo dober izkoristek. Uporabljale bi se za razsvetljavo v stanovanjskih prostorih, kot zadnja luč v LCD zaslonih, mobilnih in še kje.



Slika 13: Bela in modrikasto bela QLED dioda

Leta 2004 so odkrili, da lahko kvantna pika ustvari tudi do 3 elektrone iz enega visoko energijskega fotona sončne svetlobe. Medtem, ko današnje boljše fotocelice iz enega visoko energijskega fotona proizvedejo kvečjemu en elektron, ostalo pa se izgubi kot toplota. Kvantne pike bi lahko povečale izkoristek fotocelic iz 30% na 65%.

Naredimo jih lahko tudi v obliki *prahu*, ki bi seval v prej določenim infrardečem spektru in se zelo dobro prijel nepridiprava. Frekvenco sevanja bi zelo dobro nastavili, kar bi sovražnik težko opazili, prepoznali, še težje pa posnemal brez predhodnega znanja o sestavi in velikosti kvantnih pik. Zaradi tolikih možnosti uporabe bi bile kvantne pike posebej primerne za obveščevalne službe, vojsko in ostale varnostne sisteme. Uporabljali bi jih lahko v urbanih naseljih, vojaških kampih, kot naprave, ki bi hitro zaznale vsiljivca, v obmejnih območjih in težkih terenih kot so jame ter gore. Tak prah bi deloval kot univerzalno sledilno sredstvo, ki bi se držalo po več dni na čevljih in obleki sovražnika, ki bi šel skozi posipano območje.

Kvantne pike lahko dodamo v tudi optične sisteme in s tem spremenimo nelinearne optične lastnosti. Zaradi majhnosti imajo zelo hiter odziv (manj kot *1ps*) v absorpciji kot tudi v reflektivnosti. Na tak način so na primer naredili trdo snovni saturabilni absorber.

Če postavimo kvantne pike dovolj blizu skupaj začnejo med seboj interagirati, energijska stanja se spremenijo, tako da lahko govorimo o nekakšnih vezeh med pikami. Dobimo torej kvantno molekulo. To lahko sestavimo tudi tako, da kvantne pike povežemo s kvantno žico. Takšni sistemi pik imajo velik potencial v kvantnem računalništvu, kvantnem spominu in telekomunikacijah, saj lahko na primer naredimo niz povezanih kvantnih pik po katerem se razširjajo samo določeni signali.

Zaključek

Majhna velikost kvantnih pik je vzrok za kvantne lastnosti, ki pa so zelo zanimive tako iz znanstvenega vidika kot tehnološkega ter komercialnega. Takšne lastnosti so do sedaj bile bolj redko opazne, kar pa se je in se še bo s kvantnimi pikami kaj hitro spremenilo. S komercializacijo in prodorom v industrijo bodo v eni ali drugi obliki postale dostopne mnogim podjetjem, ki bodo izkoristili kvantne lastnosti in naredili mnogo inovativnih naprav s prav posebnimi funkcijami. Ljudje bodo dobili v roke produkte, s katerimi bodo delali marsikaj, kar si prej niso niti predstavljali da je mogoče.

Do te prihodnosti pa je še daleč. Najprej potrebujemo dovolj dobre postopke izdelave, da bodo kvantne pike takšne kot želimo, potrebna pa bo še marsikatera dobra ideja, da se bomo izognili mnogim težavam, ki nas trenutno ovirajo pri izdelavi novih naprav.

Literatura

- One-dimensional Electron Transport
<http://www.sp.phy.cam.ac.uk/SPWeb/research/1d.html>
- Quantum Transport Theory of Resonant-Tunneling Diodes
<http://www.utdallas.edu/~frensley/hlts/rtdtrans.html>