



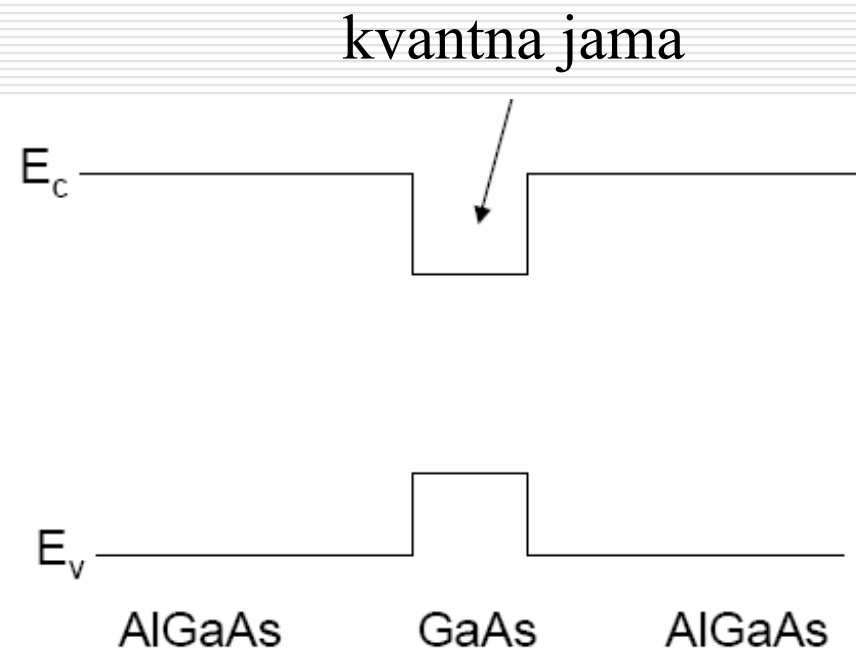
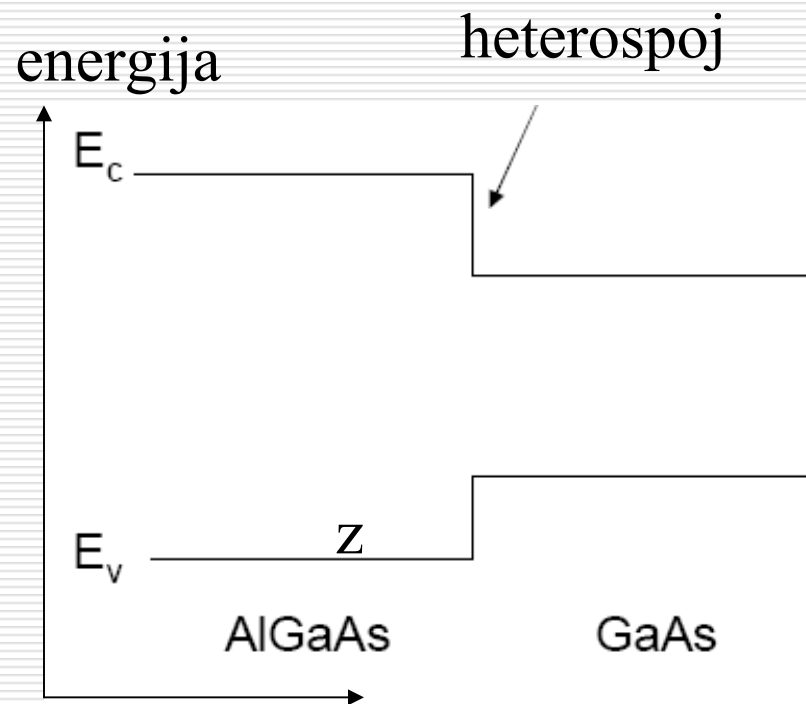
Poluprovodničke kvantne nanostrukture

Milan Tadić

Literatura

- Milan Tadić, *Poluprovodničke nanostrukture*, Zadužbina Andrejević, Beograd, 1998.
 - Milan Tadić, *Nanotehnologije i nanokomponente: predavanja*, nobel.etf.bg.ac.yu, 2007.
 - J. H. Davies, *The physics of low-dimensional semiconductors*, Cambridge University Press, 1997.
-

Poluprovodničke heterostrukture



Kvantovanje nivoa u nanostrukturama

- U kvantnim jamama elektroni su konfinirani u jednom pravcu, dok je kretanje u preostala dva pravca slobodno.
 - Da bi se pojavili kvantni efekti potrebno je da debljina sloja bude reda veličine ili manja od de Brogljeve talasne dužine, obično manje od 100 nm.
 - Najmanja debljina sloja, za rast duž [001] pravca je $a_0/2$, gde je a_0 konstanta rešetke materijala koji narasta.
-

Tipovi efekata u nanostrukturama

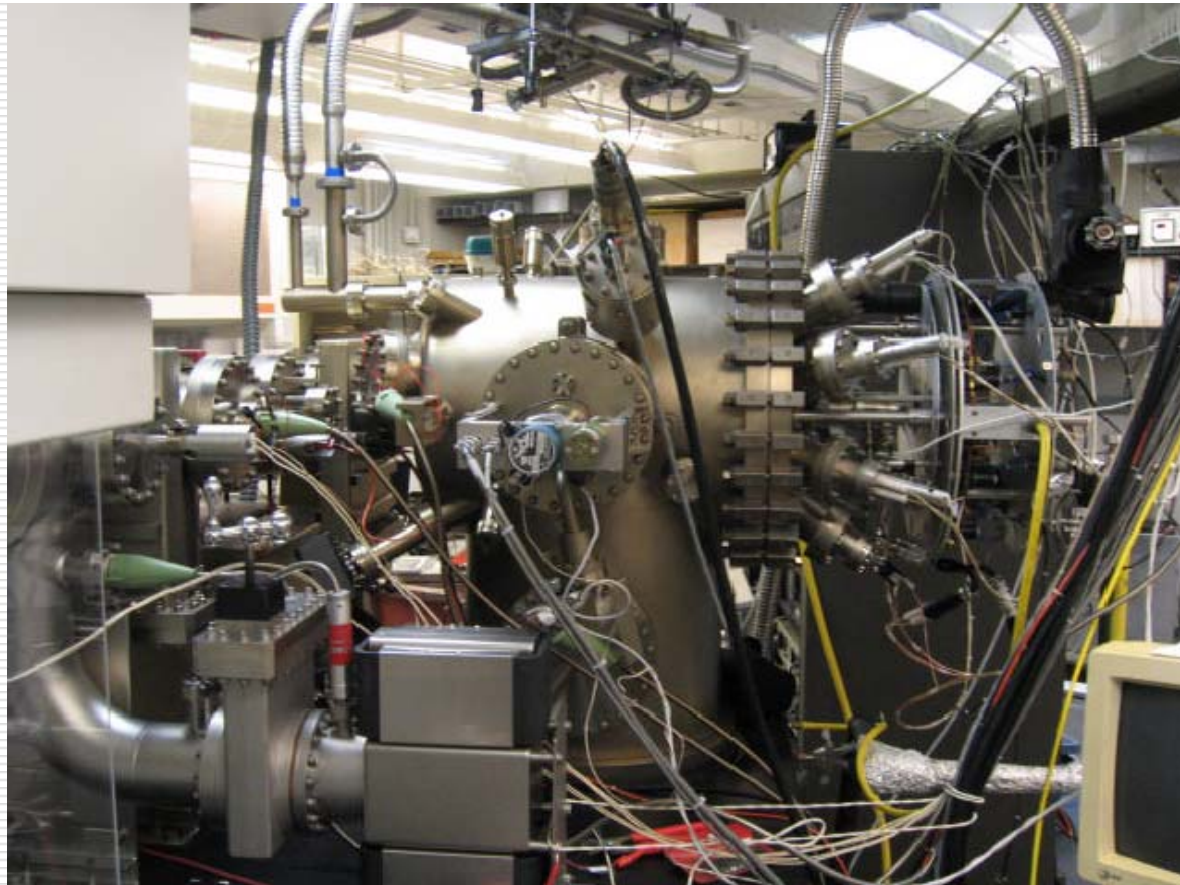
- Efekti u elektronskoj strukturi
 - Optički efekti
 - Transportni efekti
-

Fabrikacija poluprovodničkih nanostruktura

Za fabrikaciju se koriste:

- ❑ epitaksija molekularnim snopom (MBE)
 - ❑ metaloorganska epitaksija iz parne faze (MOCVD)
 - ❑ elementi IV grupe periodnog sistema, III-V i II-VI jedinjenja i njihove legure
 - ❑ fabrikacija ugljeničnih nanotuba i slojeva grafena zahteva posebne tehnike
-

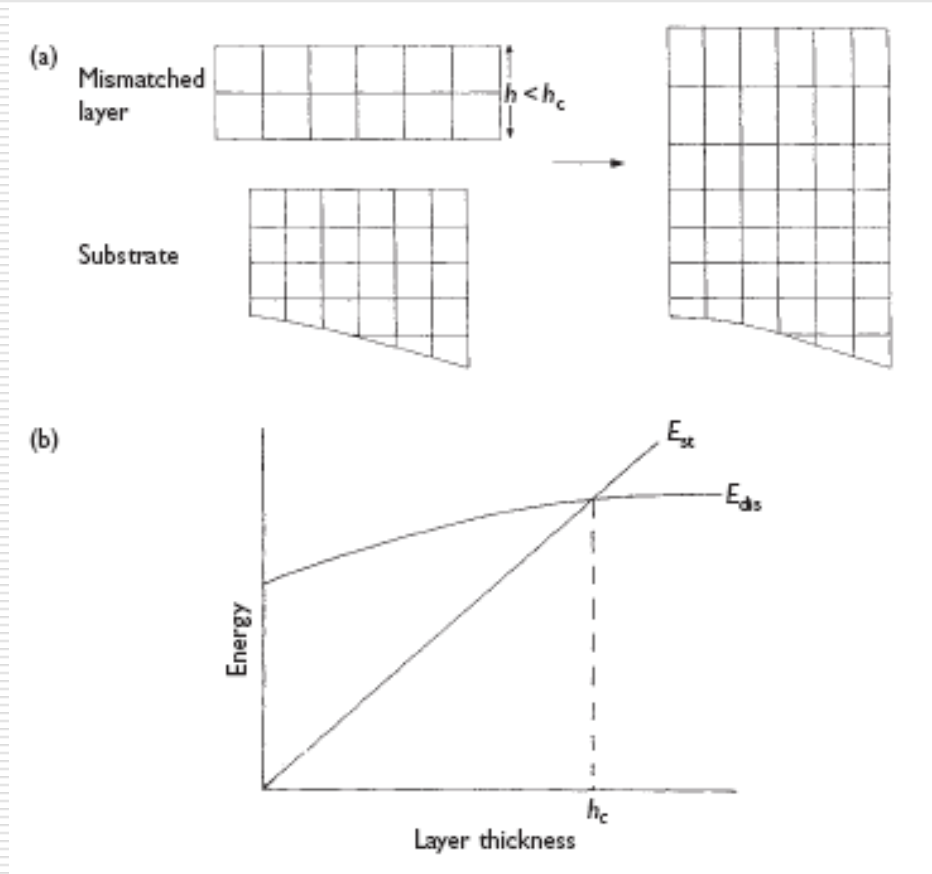
MBE oprema



Karakteristike fabrikacije

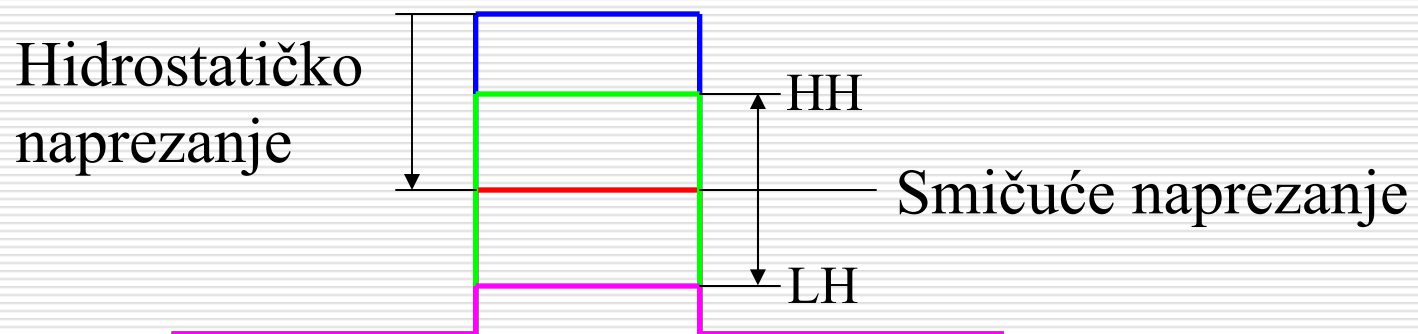
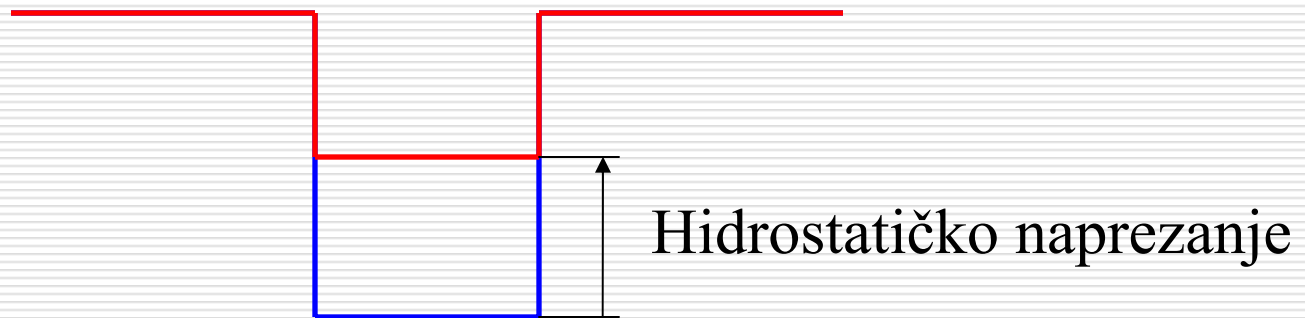
- *Razlika konstanti rešetke ne sme biti prevelika da ne bi došlo do formiranja defekata.*
 - *Najviše eksploatisan sistem je GaAs/AlGaAs. Razlika konstanti rešetke GaAs i AlAs je zanemarljiva, tako da je moguć rast debelih epitaksijalnih slojeva bez formiranja defekata.*
 - *Moguć je rast napregnutih struktura, pri čemu debljina epitaksijalnog sloja ne sme da pređe kritičnu debljinu.*
-

Napregnute struktura



Pseudomorfne kvantne jame

Uticaj kompresionog naprezanja

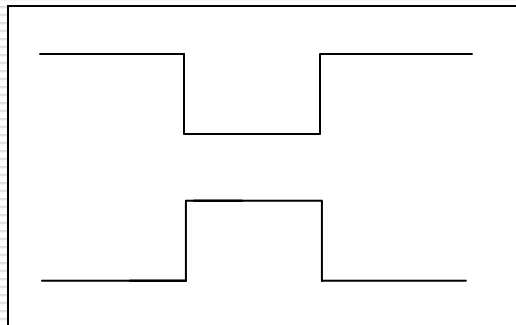


Prednosti napregnutih struktura

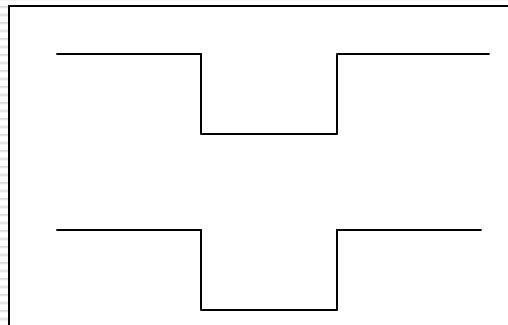
- Fabrikacija napregnutih struktura je *drastično povećala broj kombinacija* materijala koje se koriste za izradu poluprovodničkih nanostruktura.
 - Naprezanje modifikuje elektronsku strukturu, tako da se *mogu poboljšati optičke i transportne osobine*.
 - *Laseri* na bazi napregnutih materijala *imaju bolje osobine* (veće pojačanje, manju struju praga itd.).
-

Klasifikacija poluprovodničkih nanostruktura

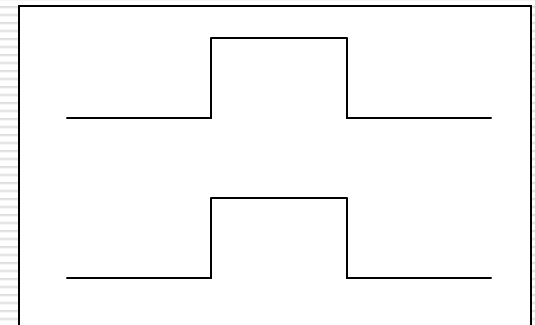
prema dispoziciji zona



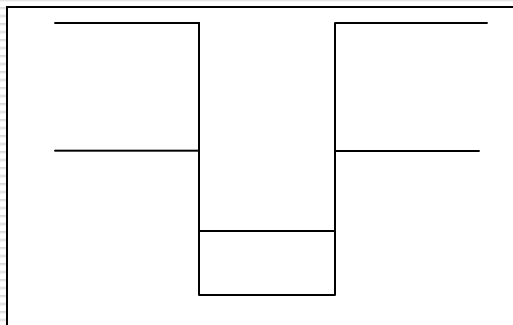
I tip



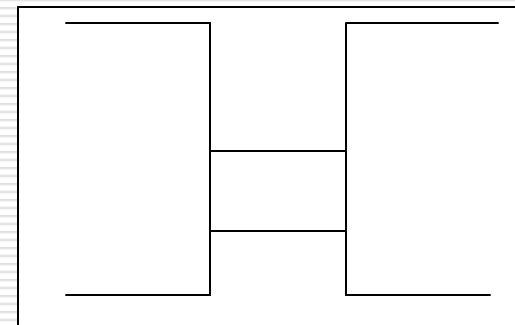
ili



II tip



II tip sa razl. en. procepom



III tip

Klasifikacija poluprovodničkih nanostruktura

prema broju pravaca konfiniranja

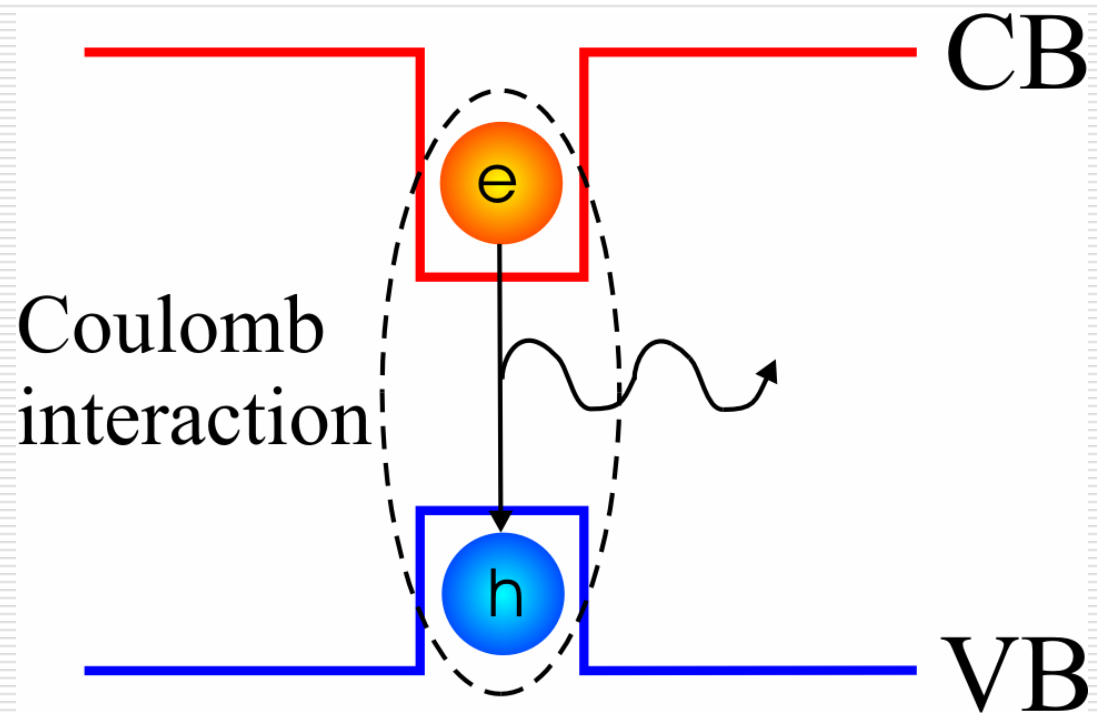
- Kvantne jame (2DEG):
 - superrešetke
 - grafen
 - Nanožice ili kvantne žice (1DEG)
 - ugljenične nanotube
 - Nanotačke ili kvantne tačke (0DEG):
 - samoasemblirane kv. tačke
-

Efekti u nanostrukturama

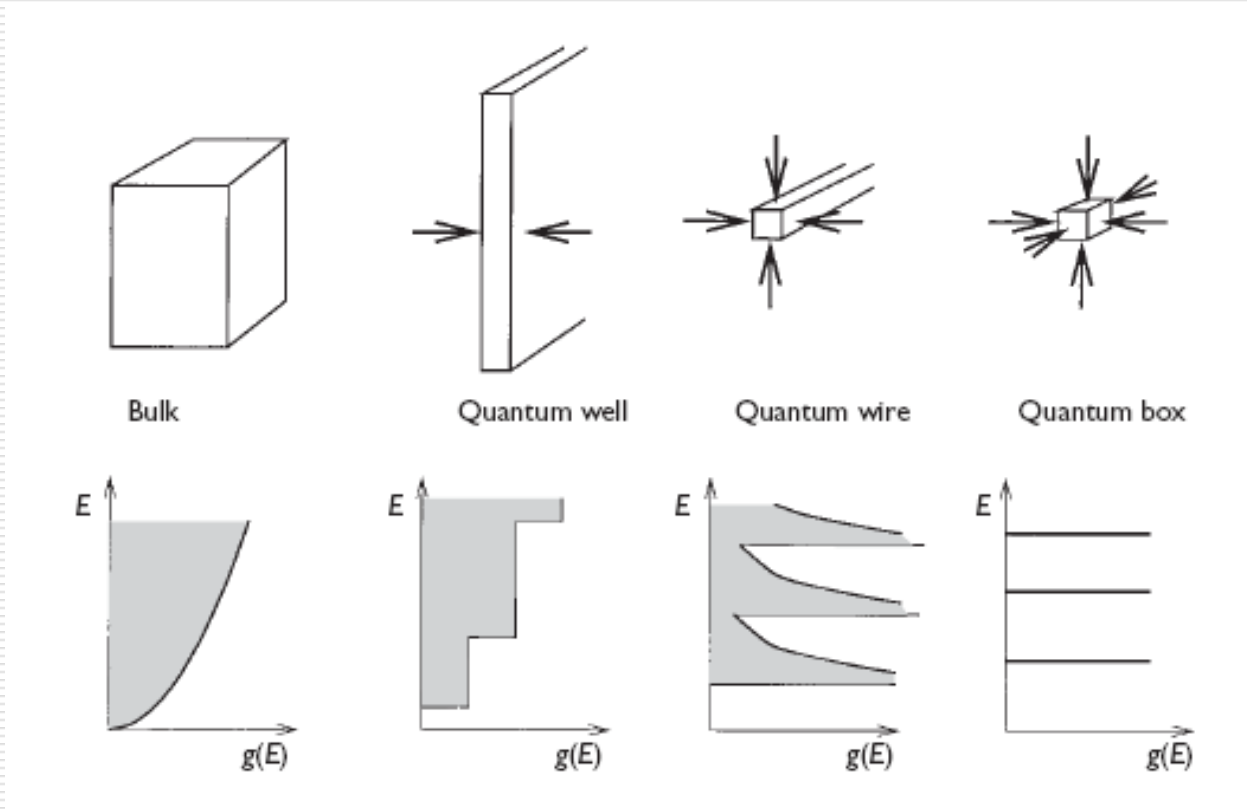
Elektronska struktura

- 2DEG i 1DEG: zona se pocepa na *podzone*; u superrešetkama se pocepa na *minizone*
 - 0DEG: diskretni nivoi (*veštački atomi*)
 - *gustina stanja* se menja u funkciji dimenzionalnosti elektronskog gasa
 - uvećana vezivna energija ekscitona
-

Eksciton



Gustina elektronskih stanja u nanostrukturama



Proračun elektronske strukture

- Šredingerova jednačina za anvelopnu funkciju po teoriji efektivnih masa :

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m} \frac{d}{dz} \right) \chi(\vec{r}) + V(\vec{r}) \chi(\vec{r}) = E \chi(\vec{r})$$

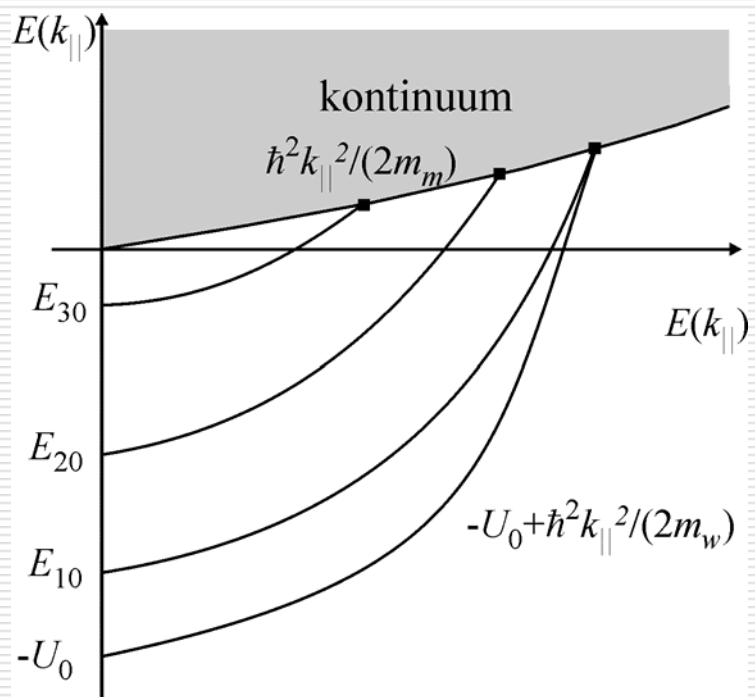
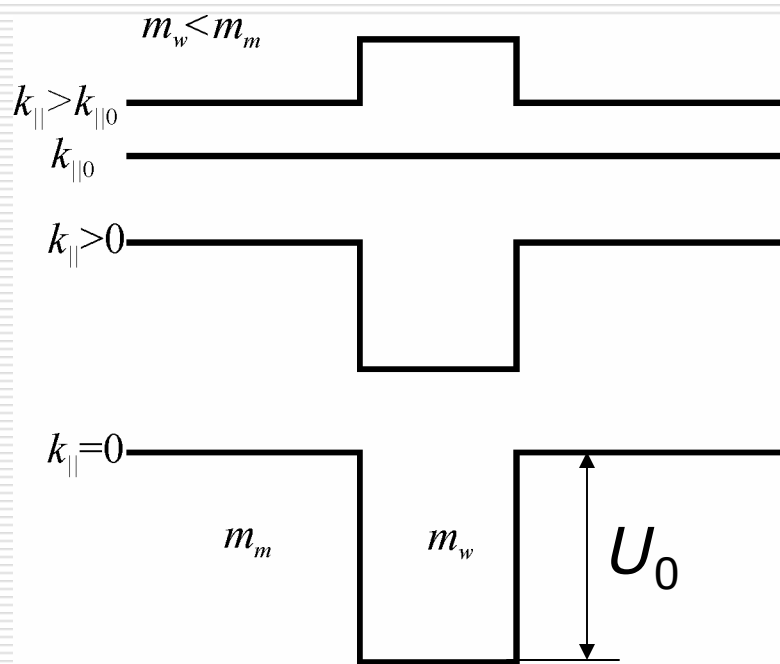
- Kretanje nosilaca je slobodno u ravni kvantne jame, pa se talasna funkcija može pisati u formi:

$$\chi(\vec{r}) = \Psi(z) e^{i\vec{k}_{\parallel} \vec{r}_{\parallel}}$$

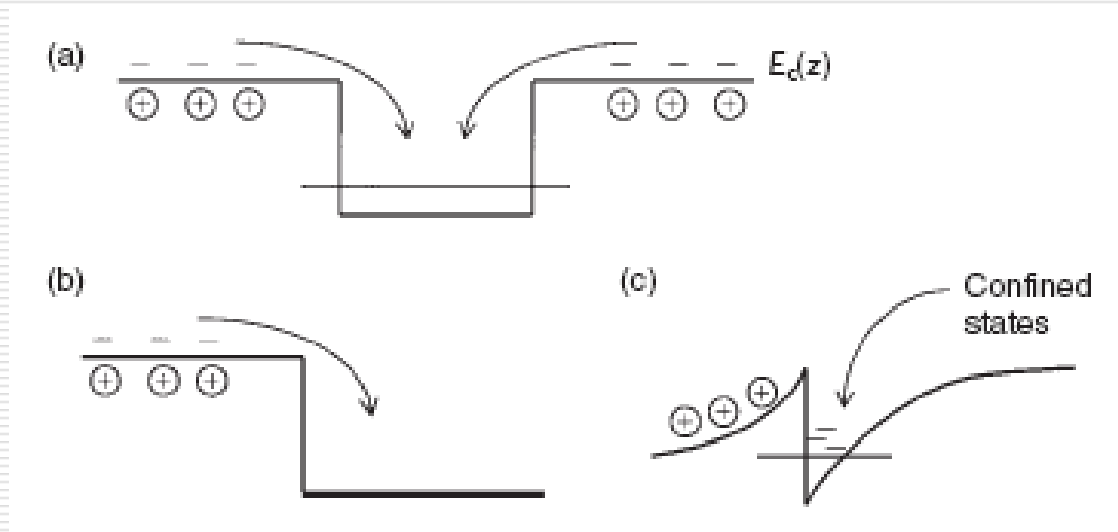
- Šredingerova jednačina za talasnu funkciju $\Psi(z)$:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m} \frac{d}{dz} \right) \Psi(z) + \left(V(z) + \frac{\hbar^2}{2m} k_{\parallel}^2 \right) \Psi(z) = E \Psi(z)$$

Podzonske disperzione relacije



Efekti usled preraspodele naelektrisanja

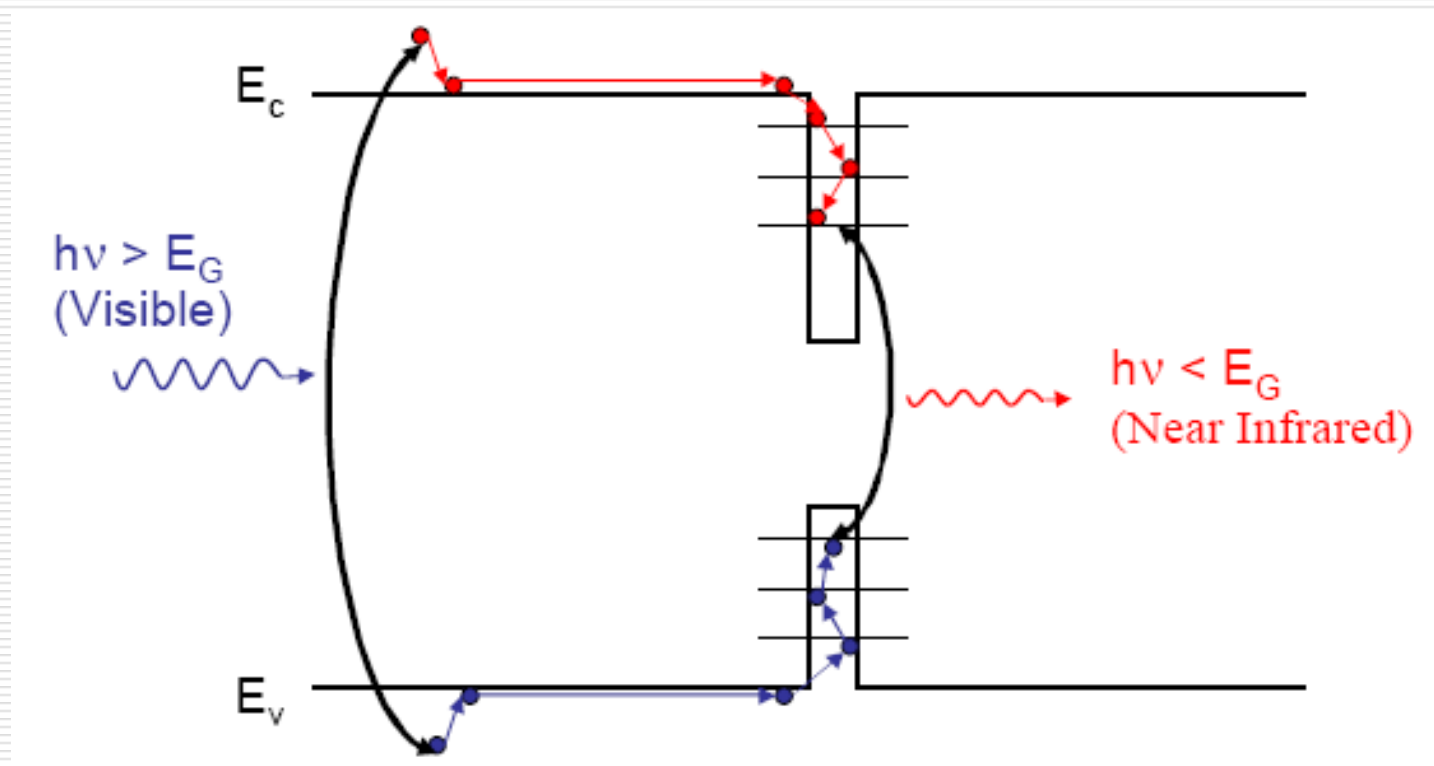


Optičke osobine nanostruktura

- ❑ crveni pomeraj apsorpcione linije za medjuzonske prelaze
 - ❑ stepenasta promena apsorpcije 2DEG kao posledica izmenjene gustine stanja
 - ❑ pojava unutarzonske apsorpcije
 - ❑ uvećani nelinearni optički efekti
-

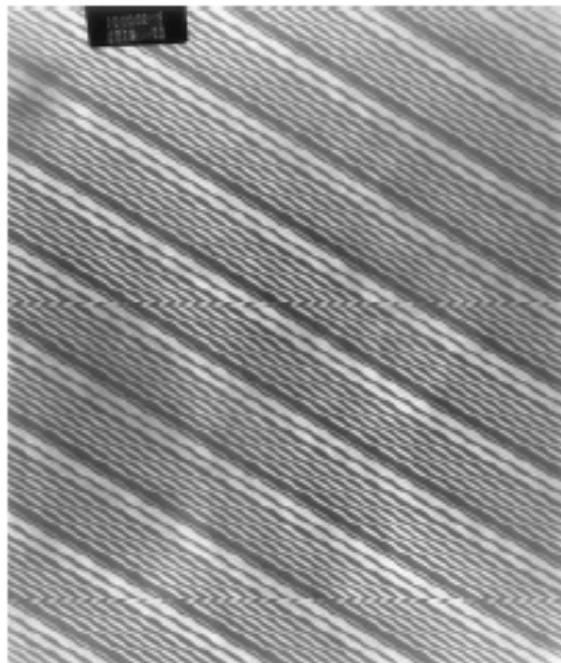
Međuzonski prelazi

Fotoluminescencija

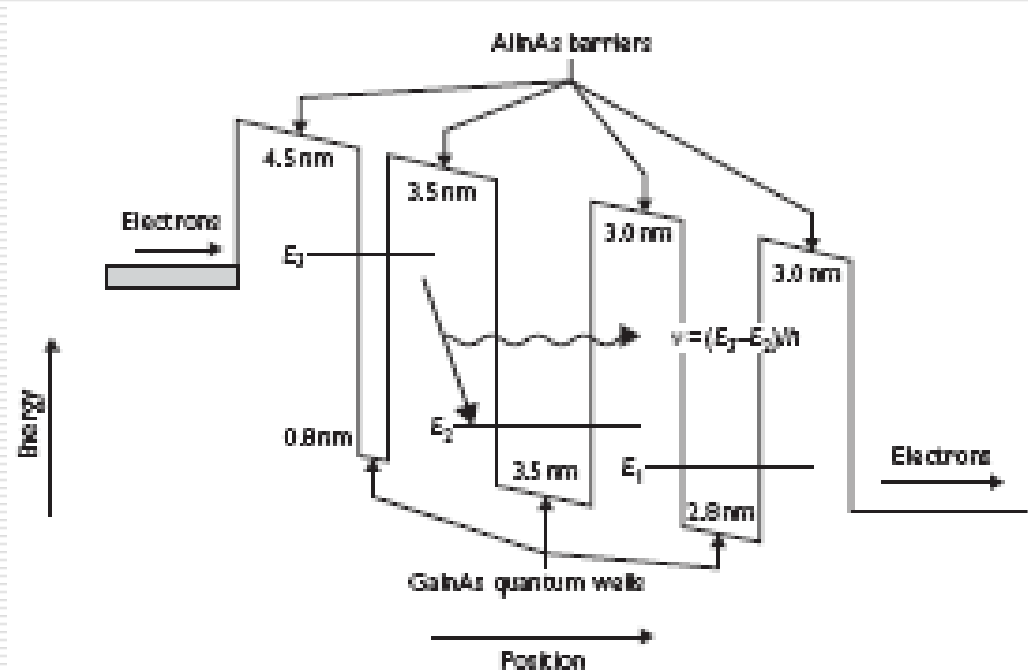


Unutarzonski prelazi

Kvantno-kaskadni laser



Poprečni presek

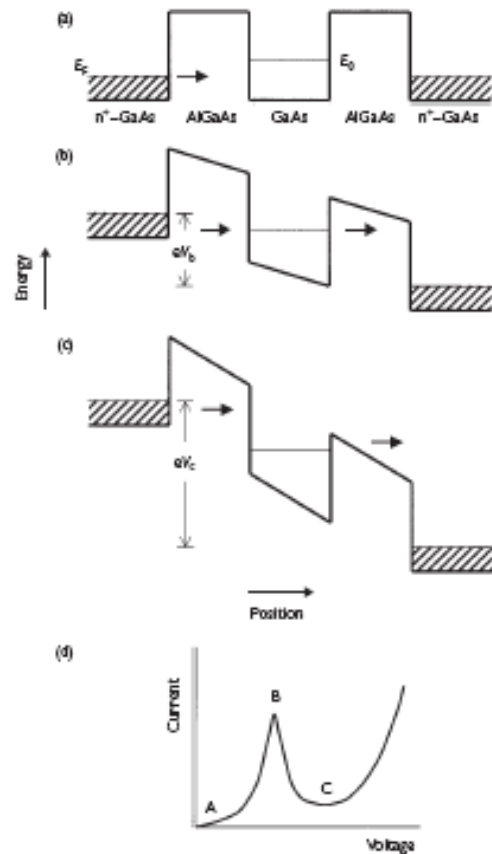


Princip rada

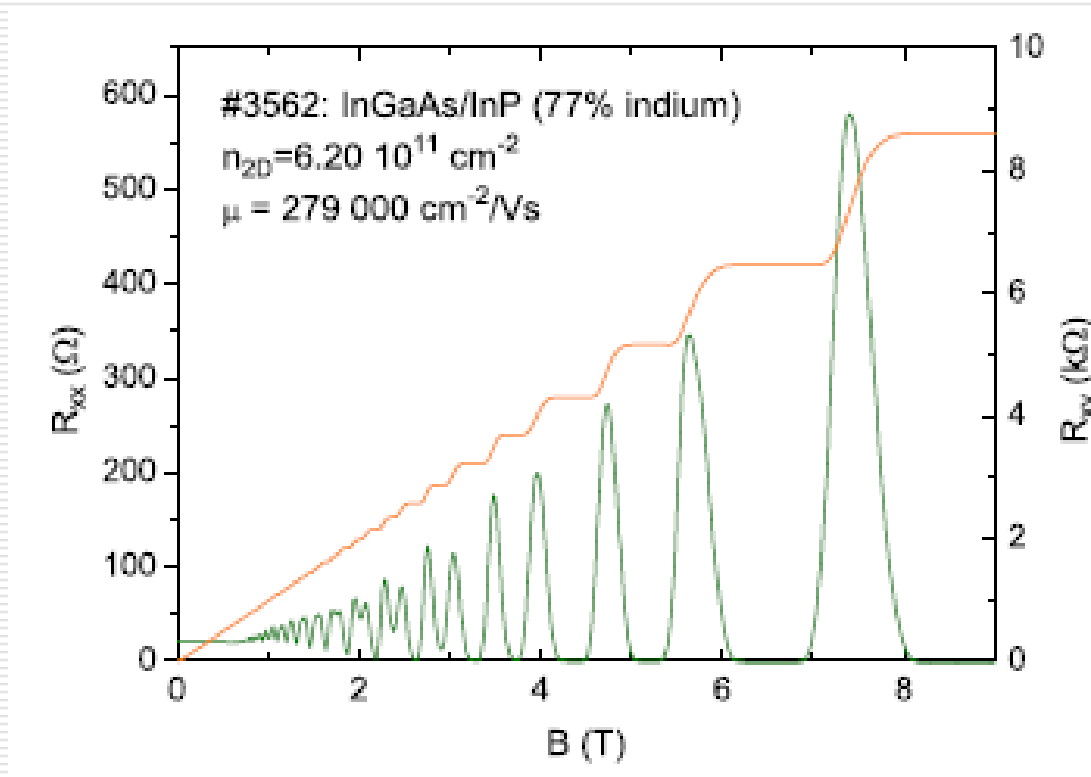
Transportni efekti u nanostrukturama

- Rezonantno tunelovanje
 - Kvantovanje provodnosti u kvantno-tačkastom kontaktu
 - Kvantni Holov efekat
 - Aharonov-Bomov efekat
 - Kulonova blokada
-

Rezonantno tunelovanje

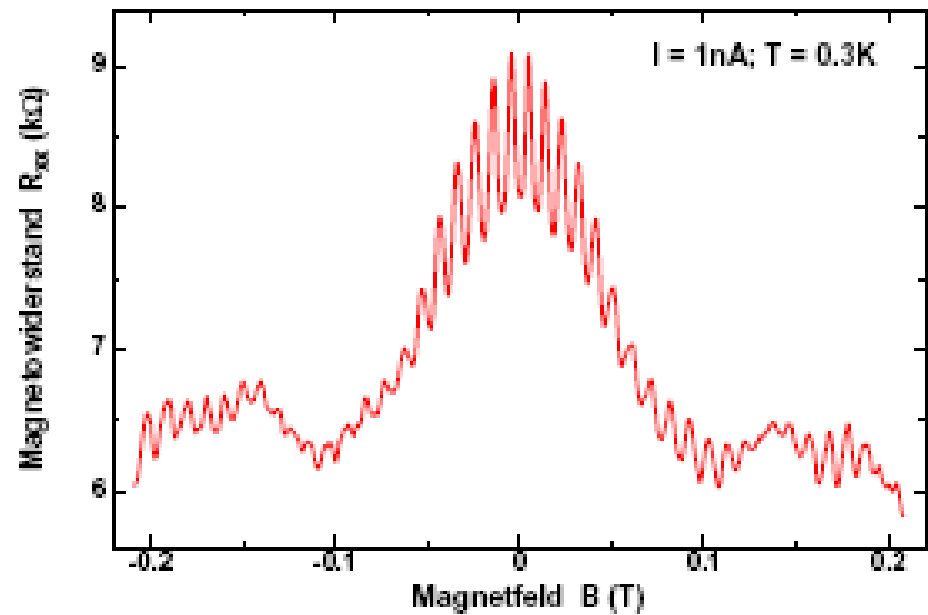
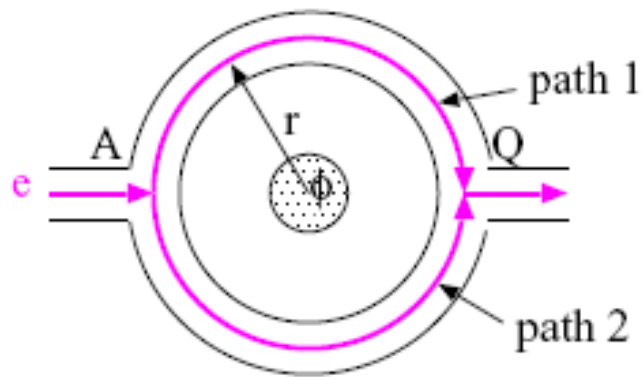


Kvantni Holog efekat



Nobelova nagrada za fiziku 1985. godine (K. von Klitzing)

Aharonov-Bomov (AB) efekat



Spintronske osobine nanostrukture (nanospintronika)

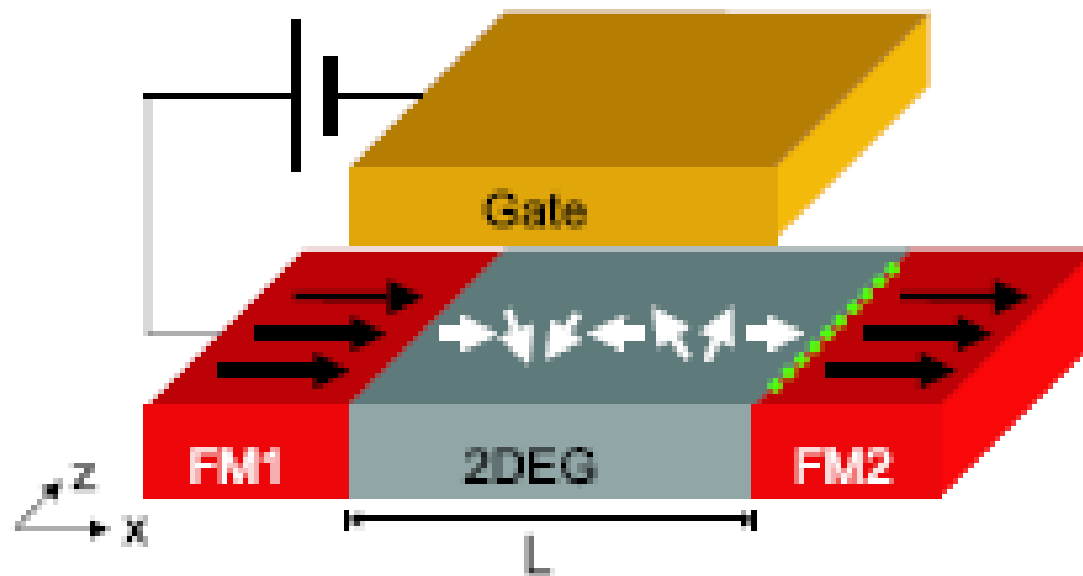
Efekti u poluprovodničkoj nanospintronici:

- Rašba efekat (usled asimetrije strukture)
 - Drezelhausov efekat (usled nepostojanja centra inverzije masivnog materijala)
 - spinski Holov efekat
 - mehanizmi rasejanja spina (Bir-Aronov-Pikus, Elliot-Yafet, Dyakonov-Perel, hiperfina interakcija)
-

Nanospintronske komponente

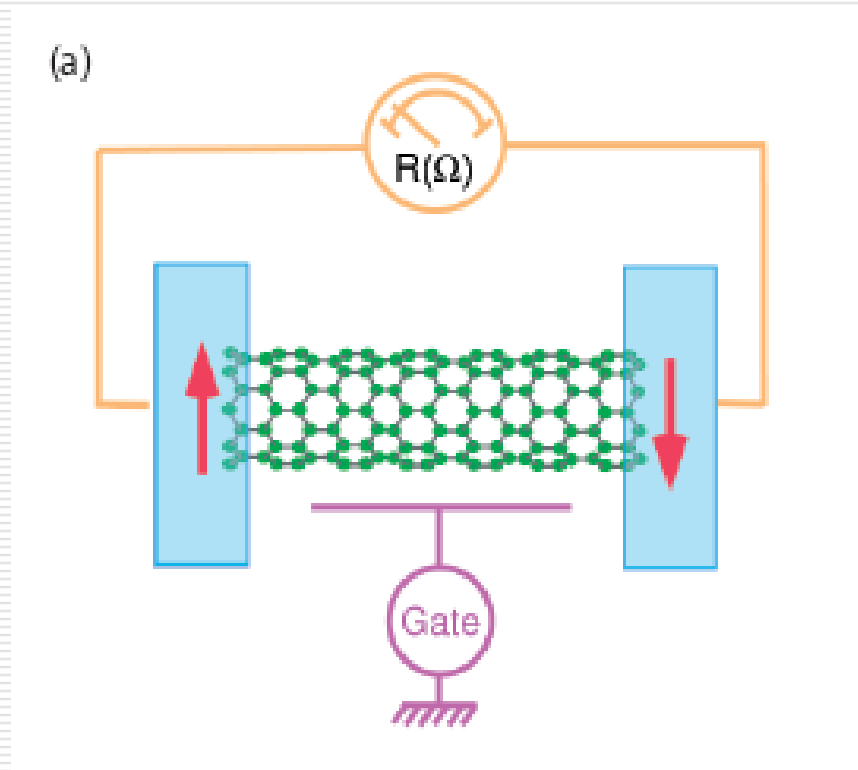
- spinski filtri
 - spinske diode
 - spinski tranzistori
 - spinske optoelektronske komponente
 - primena spina u kvantnom računarstvu
-

Datta-Das(ov) tranzistor (do sada nije proradio)



- Princip je zasnovan na kontroli spina električnim poljem posredstvom Rašba efekta
 - Problemi su vezani za efikasnu injekciju spina na spoju FM-S.
-

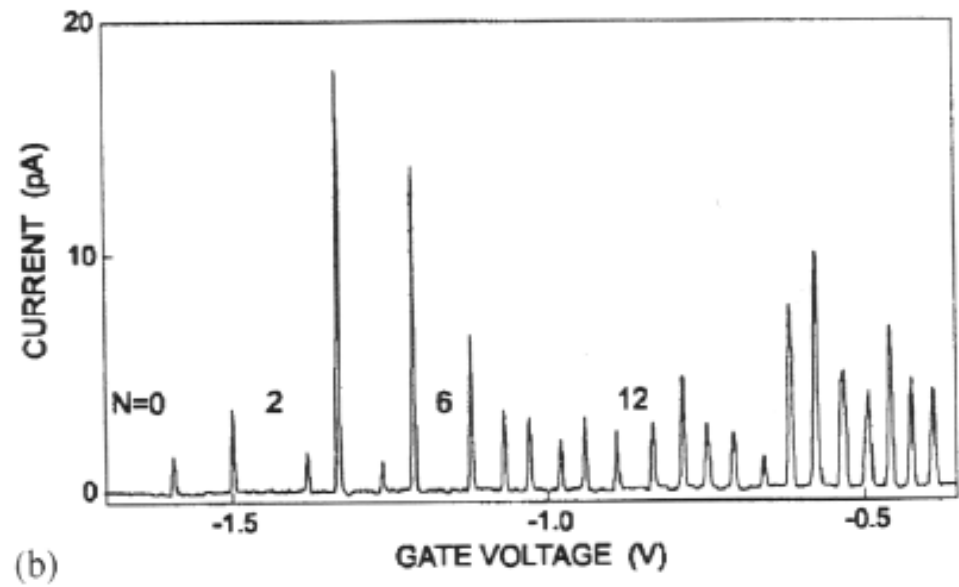
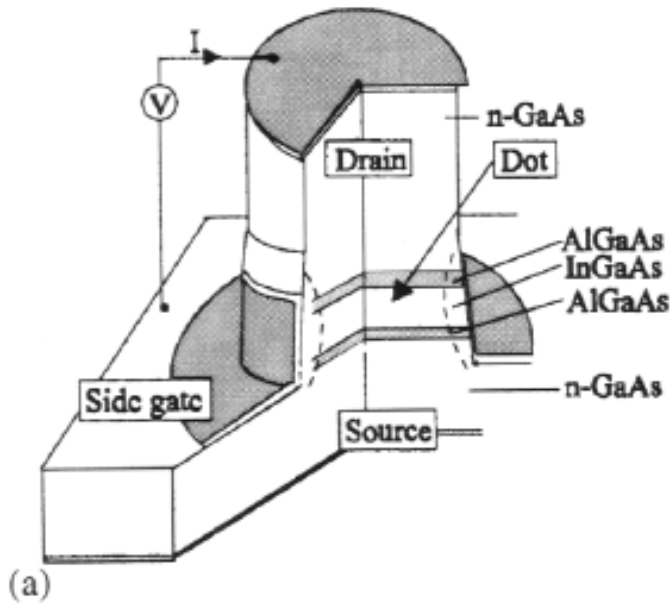
Spinski tranzistor sa nanotubama



-
- Zahtevi koji se postavljaju spinskim komponentama:
 1. efikasna injekcija spina u nemagnetske materijale
 2. minimizacija gubitka faze spina (za kolekciju elektrona)
 3. mogućnost kontrole spina tokom transporta
 4. efikasna detekcija spina
-

Kvantne tačke

Litografski definisane



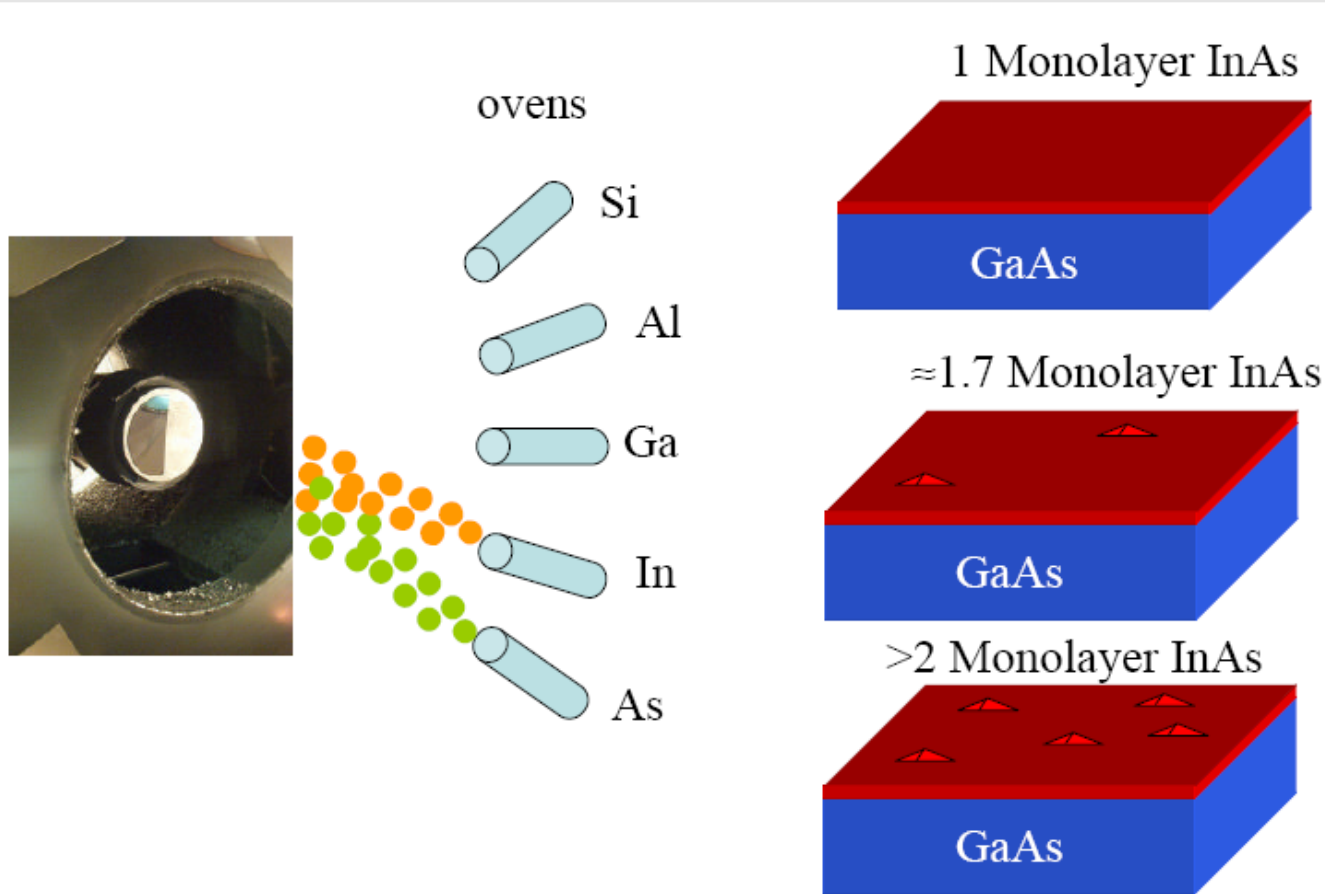
Kvantne tačke

Koloidni nanokristali

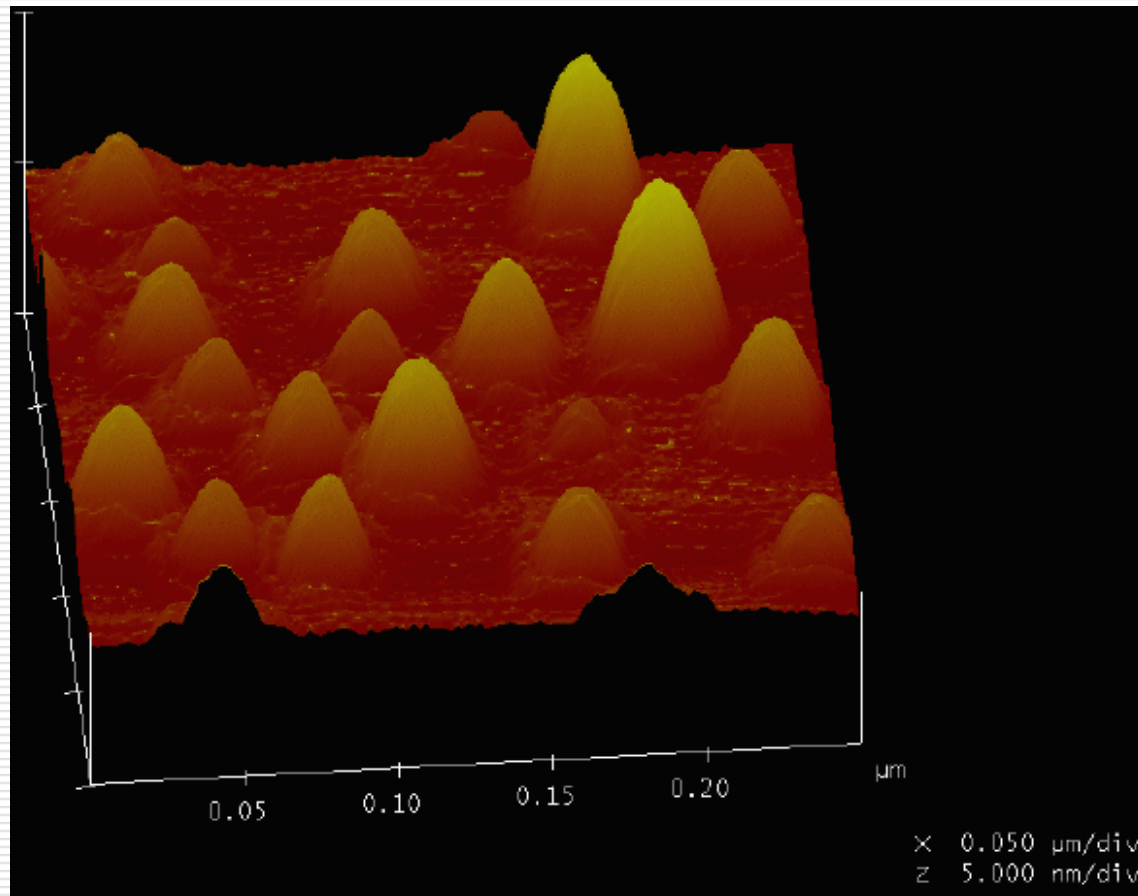


Kvantne tačke

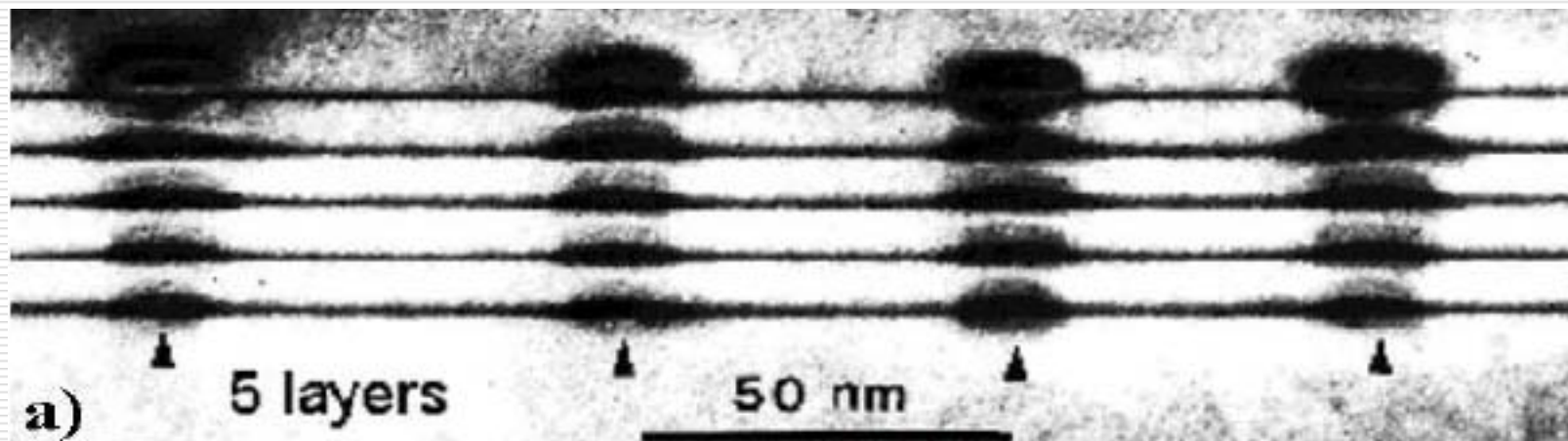
Samoasemblirane



Izgled formiranih samoasembliranih kvantnih tačkica

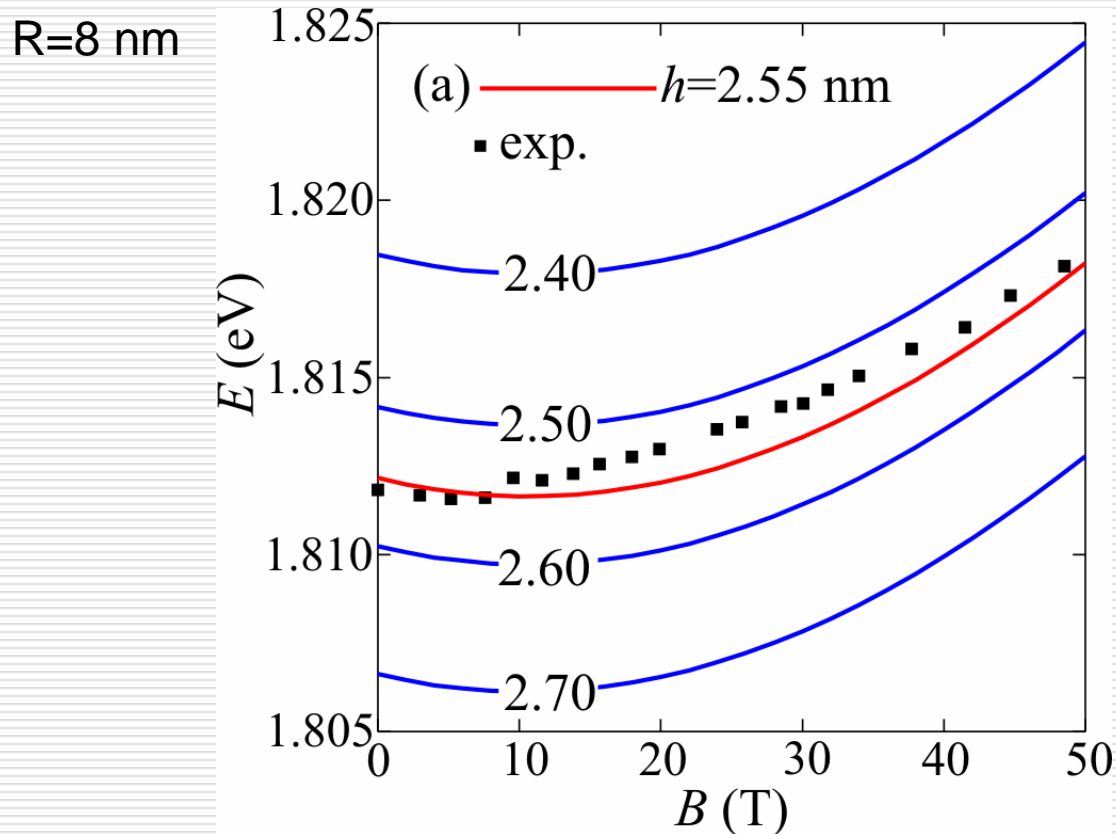


Spregnute kvantne tačke (Veštački molekuli)



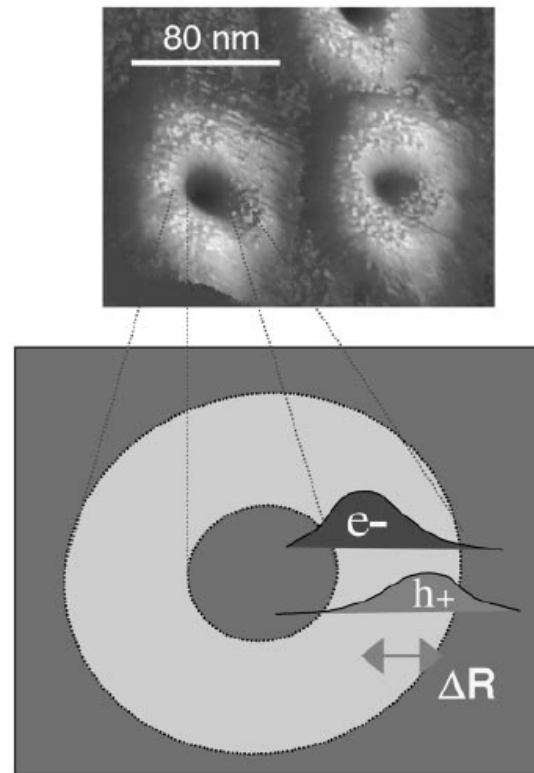
- Kvantne tačke narastaju jedna iznad druge uz pomoć naprezanja
 - Prednost je rast bez litografije
 - Nedostatak je relativno slaba kontrola dimenzija
-

Magnetoexciton in the single InP/InGaP quantum dot



Exp.: M. Hayne, PRB, 62, 10324, 2000. Theory: M. Tadic, Physica E, 2005.

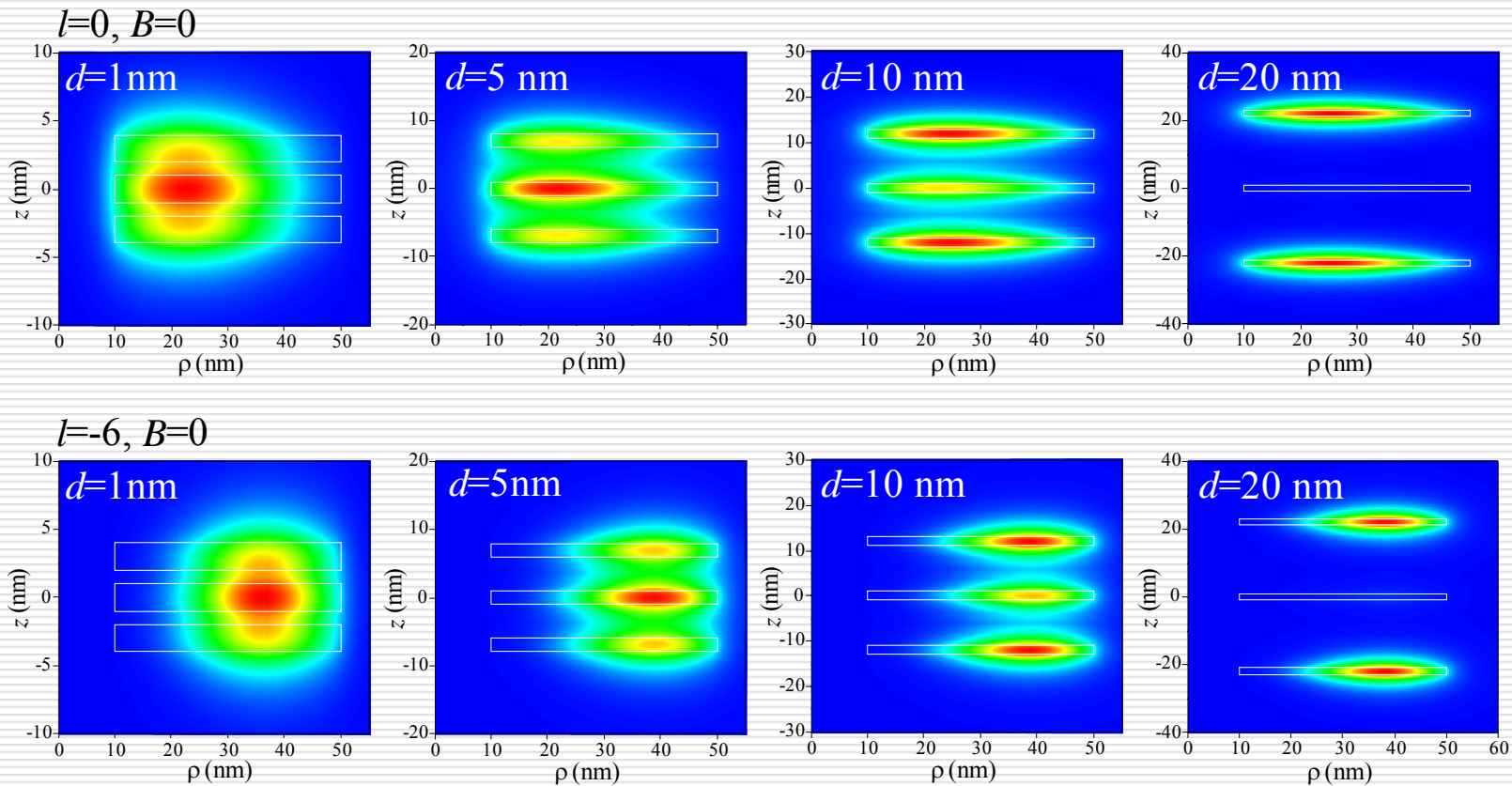
Nanoprstenovi (kvantni prstenovi)



Mogućnost postojanja ekscitonskog AB efekta.

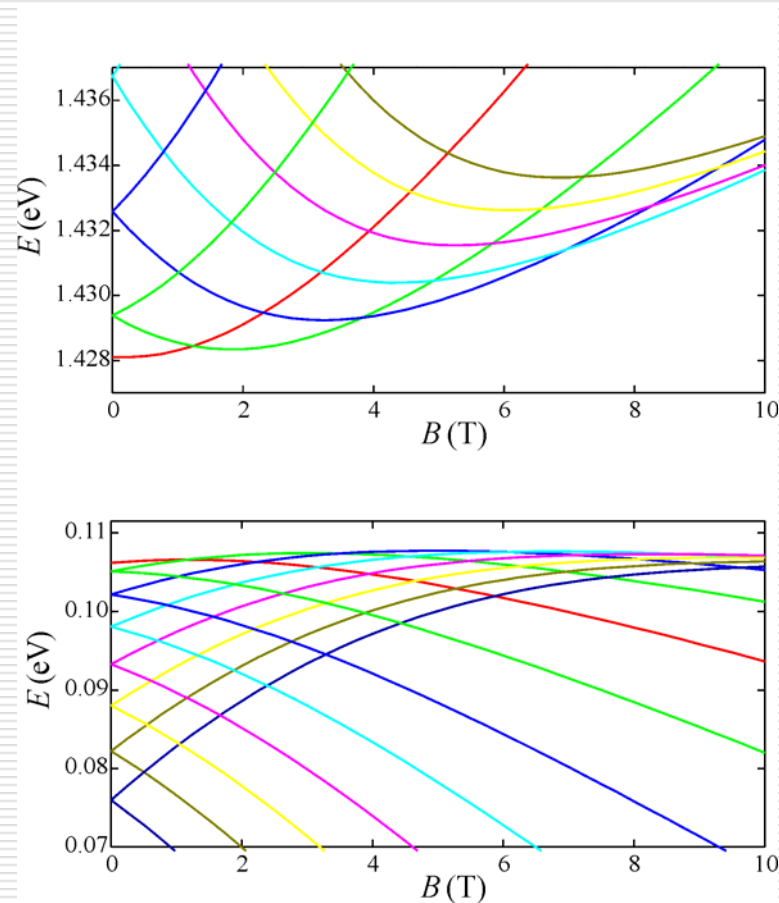
Ekscitonski AB efekat u spregnutim napregnutim prstenovima

(M. Tadić, prihvaćeno za publikovanje)

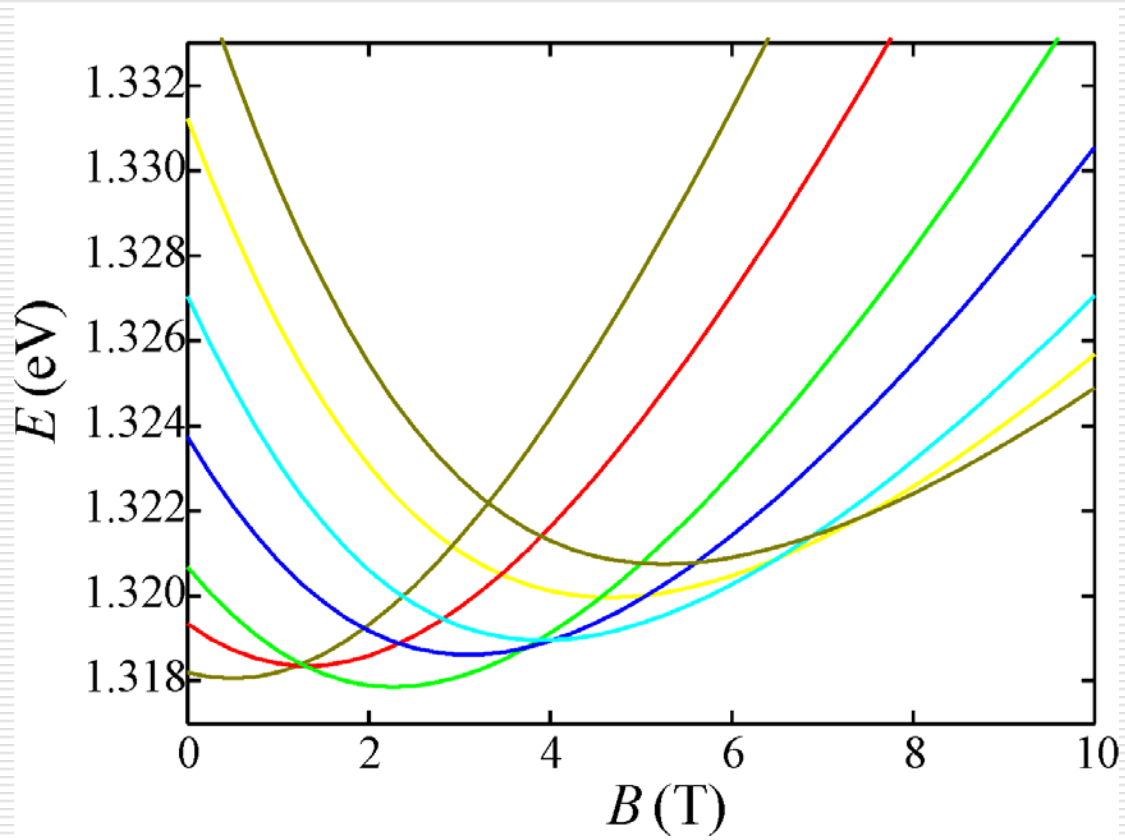


Talasne funkcije elektrona za različita rastojanja između prstenova.

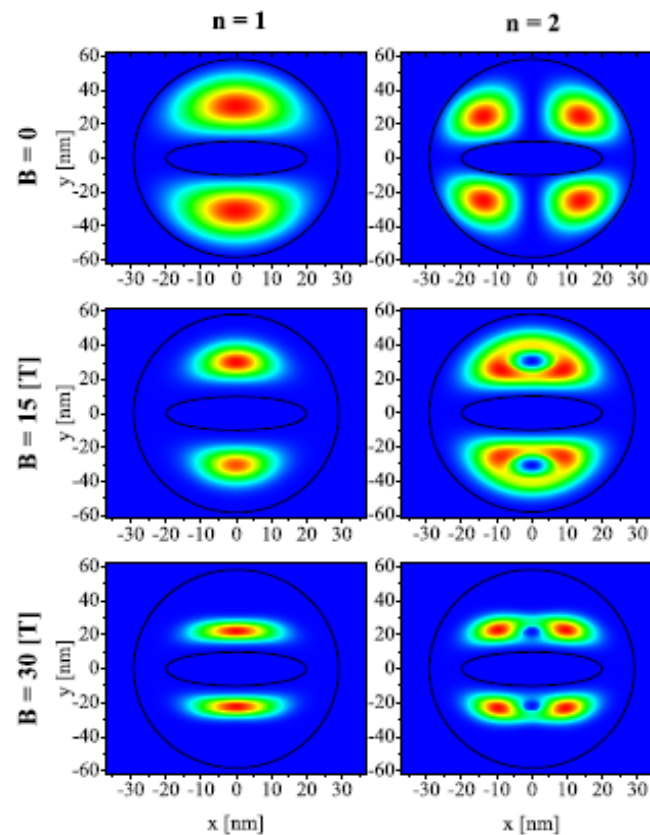
Elektronske i šupljinske energije u spregnutim prstenovima



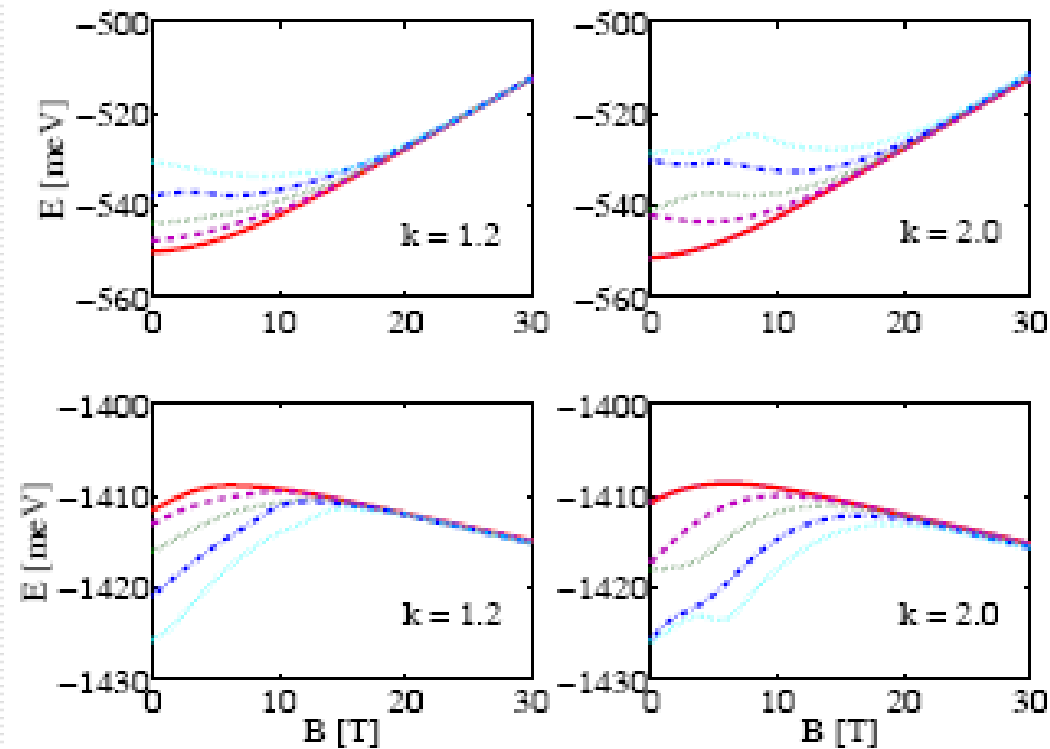
Ekscitonske energije



Elektronski AB efekat u elipsastim prstenovima (M. Milošević, student, u pripremi za publikovanje u J. Appl. Phys.)



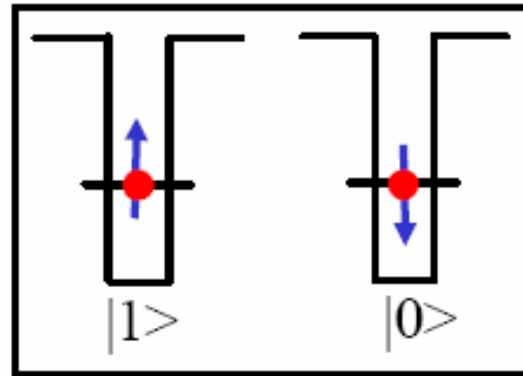
Elektronske i šupljinske energije



Buduće primene kvantnih tačaka

□ Za jednofotonske izvore

□ Za spinske kubite



□ Za jednoelektronske memorije

Izbor novijih radova

- M. Tadić and F. M. Peeters, "Binding of electrons, holes, and excitons in symmetric strained InP/InGaP triple quantum-dot molecules", *Physical Review B*, Vol. 70, 195302 (11 str.), 2004.
 - M. Tadić and F. M. Peeters, "Exciton states and oscillator strength in two vertically coupled InP/InGaP quantum discs", *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 16, 8633–8652 (20 str.), 2004.
 - M. Tadić, V. Mlinar, and F. M. Peeters, "Multiband $k \cdot p$ calculation of exciton diamagnetic shift in InP/InGaP self-assembled quantum dots", *Physica E*, Vol. 26, 212–216 (5 str.), 2005.
 - M. Tadić and F. M. Peeters, "Intersublevel magnetoabsorption in the valence band of p-type InAs/GaAs and Ge/Si self-assembled quantum dots", *Physical Review B*, Vol. 71, 125342 (15 str.), 2005.
 - V. Mlinar, M. Tadić, B. Partoens, and F. M. Peeters, "Nonsymmetrized Hamiltonian for semiconducting nanostructures in a magnetic field", *Physical Review B*, Vol. 71, 205305 (12 str.), 2005.
 - V. Mlinar, M. Tadić, and F. M. Peeters, "Hole and exciton energy levels in InP/InGaP quantum dot molecules: Influence of geometry and magnetic field dependence", *Physical Review B* 73, 235336 (10 str.) (2006).
 - I. L. Kuskovsky, W. MacDonald, A. O. Govorov, L. Mourokh, X. Wei, M. C. Tamargo, M. Tadić, and F. M. Peeters, "Optical Aharonov-Bohm effect in stacked type-II quantum dots", *Physical Review B*, Vol. 75, jul 2007.
-

Diplomski radovi iz oblasti

- Nanospintronika (sa kvantnim jamama, žicama i tačkama)
 - Modelovanje napregnutih kvantnih prstenova i tačaka
 - Linearne i nelinearne optičke osobine kvantnih tačaka
 - Optički metamaterijali i fotonski kristali (uz saradnju sa prof. Zoranom Jakšićem)
-

Saradnja

Stalna saradnja sa Univerzitetom u Antverpenu (UA).

Do sada je ukupno 5 studenata posetilo UA na duže i kraće vreme.

Predmeti za dalje usavršavanje

- Nanotehnologije i nanokomponente (8. semestar)
 - Nanomagnetizam i nanospintronika (master studije)
 - Modelovanje nanostrukture (doktorske studije)
-

Životna mudrost

- Ich habe nichts dagegen wenn Sie langsam denken, Herr Doktor, aber ich habe etwas dagegen wenn Sie rascher publizieren als denken.

(Nemam ništa protiv ako razmišljate sporo gospodine doktore, ali mi smeta ako publikujete brže nego što razmišljate.)

Wolfgang Pauli
