

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo
in informatiko



2. Kvantni celični avtomati (QCA)

II.stopnja RI, 2022/2023

Nosilec: prof.dr.Miha Mraz

6. oktober
2022



1. Vsebina poglavja

- Kvantni celični avtomati - QCA (angl. *quantum-dot cellular automata*) – avtor C.S.Lent (začetek 90-ih let prejšnjega stoletja)
- QCA strukture temeljijo na:
 - prostoru celic – avtomatov
 - dinamika v posamezni celici temelji na zakonih kvantne fizike
 - posamezna celica – QCA ali kvantna celica
- QCA strukture sestavljamo iz posameznih QCA celic (2-D, 3-D)
- QCA strukture naj bi vršile procesno – prenosno - pomnilne funkcije

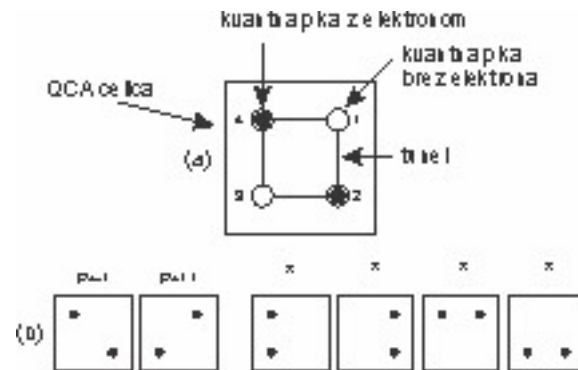


2. Arhitektura QCA celice

- Posamezna QCA celica je površinske kvadratne oblike
- V vsakem ogljišču kvadrata se nahaja kvantna pika s pozitivnim nabojem
- V celico sta ujeta dva elektrona
- V celici so sosednje pike povezane s tuneli, ki omogočajo prehajanje – tuneliranje elektronov med pikami
- Elektroni težijo k legi v pozitivno nabiti piki, ki maksimizira njihovo energetska stanje (stabilno lego)
- Lega elektronov izven pik ali tunelov ni mogoča

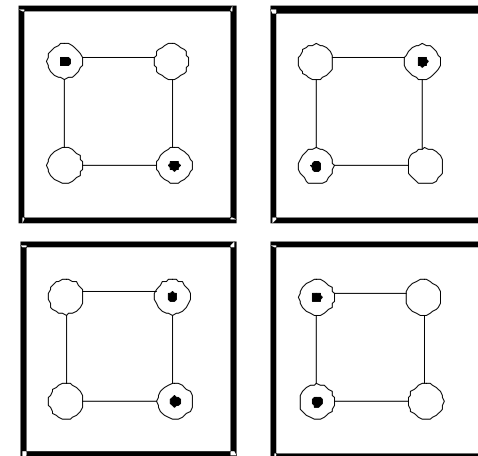


- Tendenca elektronov: doseganje "stabilnega stanja" pri katerem so odbojne sile med elektronom in elektroni v sosednjih celicah minimalne (Coulombov zakon)



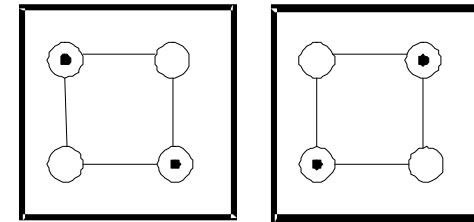


- elektroni se glede na fizikalne izračune postavijo v stabilna (diagonalna) stanja = **osnovna stanja**
- slika na desni: zgoraj osnovni (stabilni), spodaj pa neosnovni (nestabilni) stanja





- Diagonalni legi v celicah:
polarizaciji elektronov
- Interpretacije polarizacij: levi
del slike polarizacija -1 (logična
"0") in desni del slike
polarizacija 1 (logična "1")
- Velikostni redi pike, tunelov in
roba celice se gibljejo na nivoju
nm





3. Fizikalne zakonitosti dinamike

- Kvantnim pikam priredimo pozitivni električni naboj n^*e/m (m št.pik, n št.elektronov, e naboj elektrona)
- Pika z elektronom ima naboj $n^*e/m - e \rightarrow$ vsota nabojev kvantnih pik znotraj celice = 0
- Izračun elektrostatične potencialne energije izračunamo po izrazu na desni
- r_{ij} razdalja med kvant.točkama (i,j),
- ρ_i naboj kvantne točke i ,
- ϵ_0 permitivnost vakuumu
- ϵ_r relativna permitivnost medija
- E izračunamo za vse mogoče lege elektronov, za stabilno lego pa proglasimo tisto z minim.elektrost.energijo ($\min(E)$)

$$E = \sum_{i \neq j} \frac{\rho_i \rho_j}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_{ij}}$$



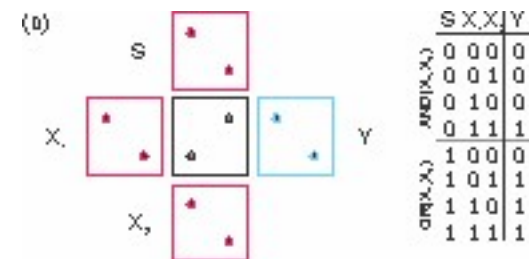
4. Strukture QCA celic

- Poljubno porazdelitev QCA celic v 2-D ali 3-D prostoru imenujemo za **QCA strukturo**; pri tem se omejimo s tem, da se celice ne morejo prekrivati;
- Osnovna ideja gradnje QCA struktur: razmeščanje, ki nas pripelje do **željene dinamike preklapov** med dvema stabilnima stanjema v opazovanih celicah strukture;
- Vrste celic v strukturah:
 - **Vhodne** (gonilniki)– preko njih dostavljamo logične vrednosti (rdeče)
 - **Notranje** (procesne) – v njih poteka prehajanje v stabilna stanja (črne)
 - **Izhodne** – v njih poteka prehajanje v stabilna stanja in iz njih odčitamo rezultat procesiranja (modre)



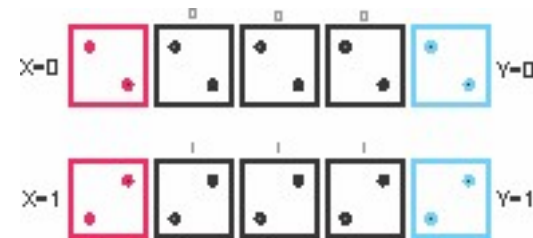
5. Osnovni QCA gradniki za dvovrednostno procesiranje

- **QCA negator (a):**
 - X vhod, Y izhod (stikanje celic v vogalih)
- **QCA majoritetna - večinska vrata (b):**
 - X_1, X_2, S vhodi, Y izhod
 - $S=1 \rightarrow$ OR vrata
 - $S=0 \rightarrow$ AND vrata
 - Lege S, X_1 in X_2 so izmenljive
 - $Y = X_1 X_2 \vee X_1 S \vee X_2 S$
- Ugotovitev: **imamo poln funkcijski nabor**





- **Vodilo** (angl. *wire*) za prenos podatkov:
 - X vhod
 - Y izhod
 - Propagacija logične vrednosti od leve proti desni
- Ugotovitev: v QCA strukturah lahko podatke prenašamo in nad njimi izvajamo poljubne logične funkcije





- **Alternirajoče vodilo:**

- QCA celice rotirane za 45 stopinj
- X vhod, Y izhod
- Alternirajoč prenos logičnih vrednosti
- Uporaba v funkciji vodila – odčitavanje na lihih pozicijah
- Uporaba v funkciji negatorja?

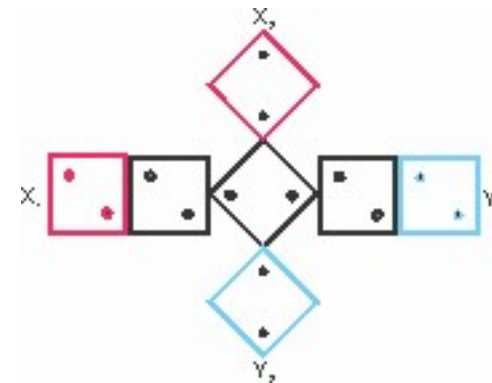




- **Brezizgubno križanje vodil:**

- X_1, X_2 vhoda, Y_1, Y_2 izhoda
- Križanje deluje za vse možne vhodne kombinacije logičnih vrednosti

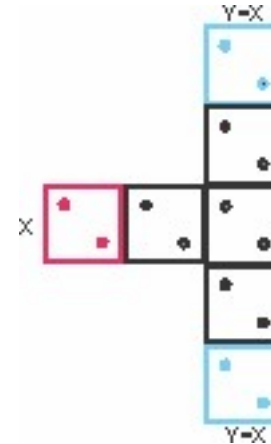
- Ugotovitev: **vodila se lahko križajo**; odprava večplastnosti vezij?



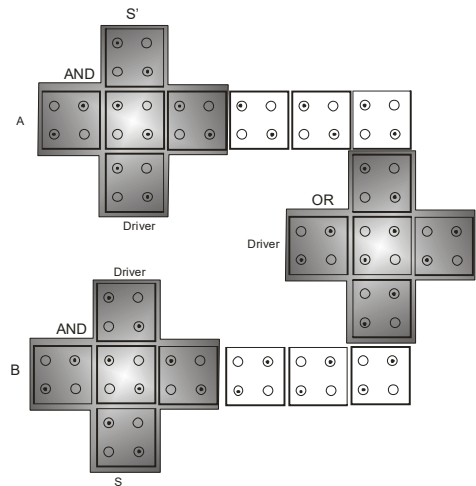


- **Razmnoževanje logičnega signala (angl. fan-out):**

- X vhod, Y izhod



- **2x1 QCA multiplekser ($Y=AS'+BS$):**





6. Ura v QCA

- Doslej: vhodne celice (gonilniki) fiksne, notranje in izhodne celice (oboje proste) se polarizirajo skozi čas dinamičnega preklopa
- Kaj če pride do polarizacije v nepravi smeri -> struktura se lahko ujame v lokalni energetski minimum, kar pomeni, da globalnega ne bo dosegla -> logična napaka v procesiranju -> napačen odziv strukture v primerjavi z željeno prevajalno funkcijo
- Odprava problema: vpeljava ure v obliki električnega polja nad množicami celic (brez neposrednih povezav do celic) -> namen kontrole (odpiranja/zapiranja) pregrad – tunelov med pikami v posameznih kvantnih celicah
- Vpeljava ure vodi v "adiabatnost" preklopa





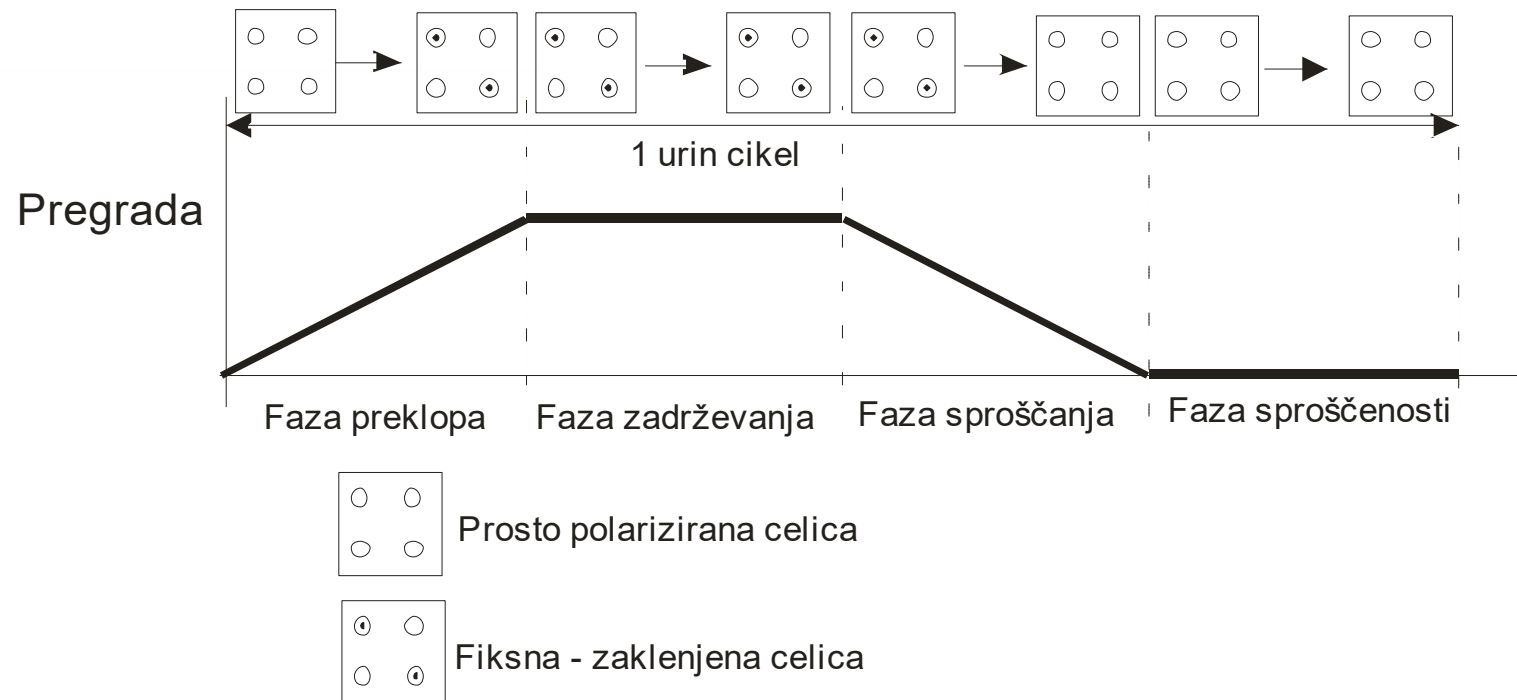
- Štiri urine faze v QCA:
 - faza preklopa (angl. *Switch*): faza zapiranja pregrad med tuneli
 - faza zadrževanja (angl. *Hold*): faza zaprtih pregrad med tuneli
 - faza sproščanja (angl. *Release*): faza odpiranja pregrad med tuneli
 - faza sproščenosti (ang. *Relax*): faza odprtih pregrad med tuneli



- Delovanje urinih faz:
 - 1.faza: ob zapiranju pregrad celice pričnejo iz nepolariziranih stanj prehajati v polarizirana glede na vpliv okolice
 - 2.faza: pregrade so zaprte, tuneliranje je onemogočeno – stanje celic se vzdržuje: celice s to fazo igrajo vlogo vhodnih celic – gonilnikov
 - 3.faza: pregrade se odpirajo: elektroni zopet začnejo prehajati med pikami
 - 4.faza: pregrade so spuščene in celice so proste
- 1 urina perioda: = 4. opisane faze
- Posamezna faza ure ne glasi na posamezno celico (kompleksnost povezav), temveč na **množice** celic



- Shema menjavanja urinih faz:



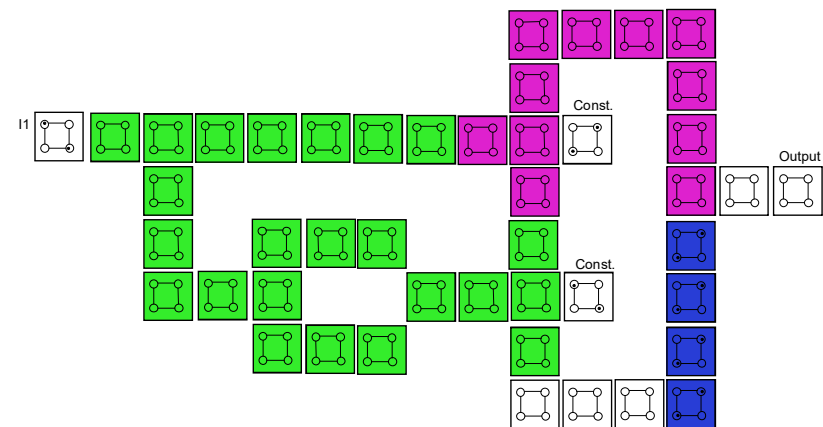


- Koncept delitve QCA strukture na posamezna urina področja:
 - vse celice v istem področju si delijo isto uro (skozi čas si delijo isto fazo)
 - fizično "sosednji" področji sta v sosednjih urinih fazah
- Naloga ure v QCA:
 - omogoča sekvenčno obdelavo logičnih funkcij (diktiranje vrstnega reda operacij)
 - omogoča ojačenje (v 2.fazi zadrževanja) – analogija močnostnemu ojačanju v klasičnih vezjih



7. Realizacija pomnilne celice s strukturo QCA

- Zelena 1.faza preklopa
- Viola: 2.faza zadrževanja
- Bela: 3.faza sproščanja
- Modra: 4.faza sproščenosti (predefinirane – konstante!!!)
- Ugotovitev: imamo vse gradnike za gradnjo QCA računalnikov





8. Referenčno programsko orodje

- QCADesigner:
 - Avtor K.Walus
 - Orodje javno razpoložljivo
 - Orodje vsebuje:
 - Grafični vmesnik za postavljanje struktur
 - Simulator za preverjanje dinamike postavljenih struktur
 - Dostop: spletna učilnica predmeta



9. Povzetek QCA

- primer robno gnanega procesiranja (angl. *edge driven processing*)
- majhna poraba energije
- hiter takt
- brez notranjih metaliziranih povezav
- možnost križanja vodil
- dve stanji:
 - osnovno (polarizirano, stabilno)
 - vzbujeno (nepolarizirano)
- problem: majhna razlika v energiji med dvema stanjema iz česar sledi velik vpliv okolja (T) na dinamiko struktur



10. Priporočeni viri

- [1] T.Orač: Realizacija aritmetično – logičnih primitivov s strukturami QCA (dipl.delo na FRI) – OSNOVE QCA, OPIS PROGRAMSKEGA ORODJA ZA POSTAVLJANJE QCA STRUKTUR – glej spletno učilnico
- [2] M.Janež: Metode razmeščanja in povezovanja logičnih primitivov kvantnih celičnih avtomatov (preberite 2.poglavje, cca 40 strani) – 1. in 2. poglavje preberi
- [3] J.Virant: Načrtovanje nanoračunalniških struktur, Didakta, Radovljica 2007 (knjigo si lahko izposodite v knjižnici FRI)