

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo
in informatiko



2. Kvantni celični avtomati (QCA)

II.stopnja RI, 2015/2016

Nosilec: prof.dr.Miha Mraz

3. oktober
2015



1. Vsebina poglavja

- Klasično delo: struktura QCA (angl. *quantum-dot cellular automata*) – kvantni celični avtomat
- Naša nadgradnja: struktura EQCA (angl. *extended quantum-dot cellular automata*) – razširjeni kvantni celični avtomat s poudarkom na trostanjskih sistemih
- obe strukturi temeljita na:
 - prostoru celic – avtomatov
 - dinamika v celicah temelji na zakonih kvantne fizike



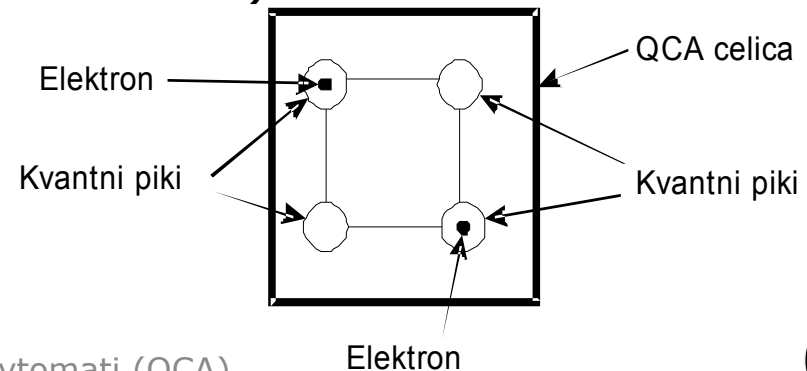
2. Klasična QCA struktura

- Avtor QCA struktur (začetek 90-ih let prejšnjega stoletja): C.L.Lent (University of Notre Dame)
- Temelj QCA strukture je **celica**
- Vsako celico QCA strukture si interpretiramo kot avtomat četrkotne oblike
- Celice so v prostoru (2-D ali 3-D) poljubno razporejene, pri čemer se ne smejo prekrivati
- Poljubno razporeditev množice celic imenujemo za **QCA strukturo**



2.1 Opis posamezne QCA celice

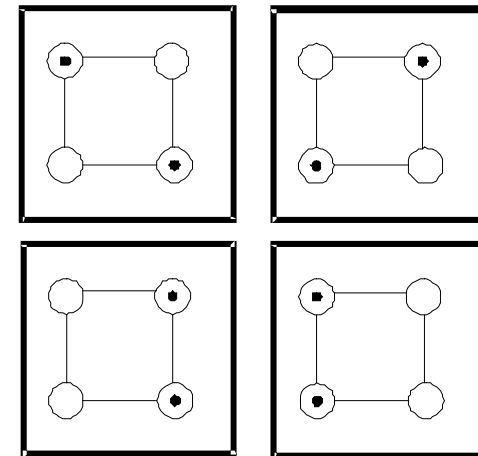
- V QCA celici imamo štiri polprevodniške kvantne pike s pozitivnim privlakom, dva elektrona in štiri tunele, preko katerih elektrona prehajata med kvantnimi pikami
- Postopek prehajanja elektrona med pikami po tunelih: tuneliranje
- Tendanca elektronov: doseganje "stabilnega stanja" pri katerem so odbojne sile med elektronom in elektroni v sosednjih celicah minimalne (Coulombov zakon)
- Razdalje med pikami v celici 20nm, velikost pike 10nm, razdalje med istoležečimi pikami v sosednjih celicah 60nm (odvisno od tehnologije izvedbe)



2. Kvantni celični avtomati (QCA)

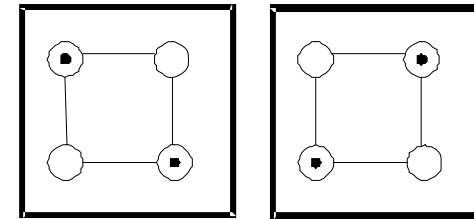


- Nahajanje elektronov izven tunelov ali pik ni mogoče
- Večina primerov: elektroni se glede na fizikalne izračune postavijo v stabilna (diagonalna) stanja = **osnovna stanja**
- slika na desni: zgoraj osnovni (stabilni), spodaj pa neosnovni (nestabilni) stanja





- Diagonalni legi v celicah:
polarizaciji elektronov
- Interpretacije polarizacij: levi
del slike polarizacija -1 (logična
"0") in desni del slike
polarizacija 1 (logična "1")





2.2 Fizikalne zakonitosti dinamike

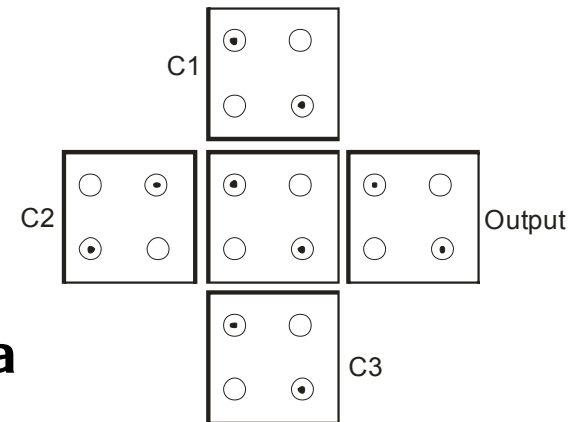
- Kvantnim pikam priredimo pozitivni električni naboj n^*e/m (m št.pik, n št.elektronov, e naboj elektrona)
- Pika z elektronom ima naboj $n^*e/m - e \rightarrow$ vsota nabojev kvantnih pik znotraj celice = 0
- Izračun elektrostatične potencialne energije izračunamo po izrazu na desni
- r_{ij} razdalja 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 ($\min(E)$)

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



2.3 QCA majoritetna vrata

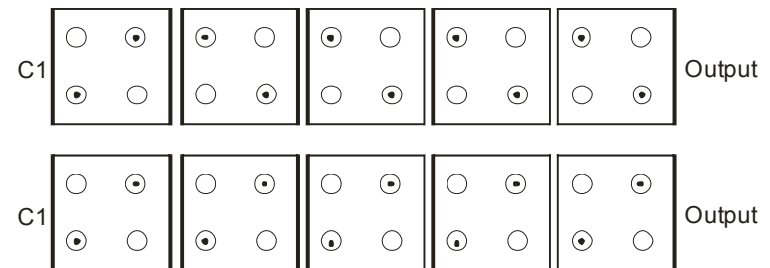
- Slika desno: majoritetna vrata, ki vršijo funkciji AND in OR
- $C3=0$ -> AND vrata
- $C3=1$ -> OR vrata
- $C1, C2$ logični vhodni spremenljivki (AND($C1, C2$) ali OR($C1, C2$))
- $C1, C2$ **vhodni** celici
- $C3$ gonilnik (angl. driver) – **konstanta**
- Output – izhodna **prosta** celica
- Neoznačena celica v sredini: **prosta** delovna celica
- $Output = C1C2 + C2C3 + C1C3$





2.4 QCA 90° žica za prenos podatkov

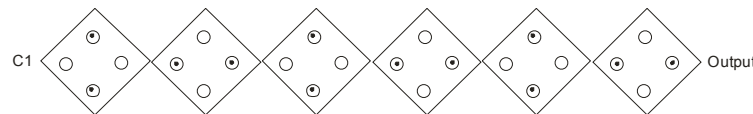
- QCA 90° ravna žica (angl. *wire*) omogoča prenos podatkov
- C1 vhod: konstanta - gonilnik, ostale celice proste;
- gornji del slike: nepolarizirana stanja,
- spodnji del slike: doseženo OSNOVNO stabilno stanje
- kaj smo dosegli: propagacija log.vrednosti od leve proti desni





2.5 QCA 45° žica za prenos podatkov

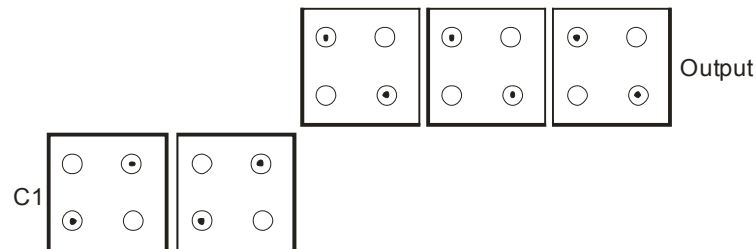
- Alternirajoča 45° žica
- C1 vhod: gonilnik – konstanta, ostale celice proste
- Slika: osnovno stabilno stanje po polarizaciji;
- Dostava log.vrednosti na željeno pozicijo zahteva liho dolžine žice, sodo dolžine dostavi negirano vrednost





2.6 Funkcija logične negacije

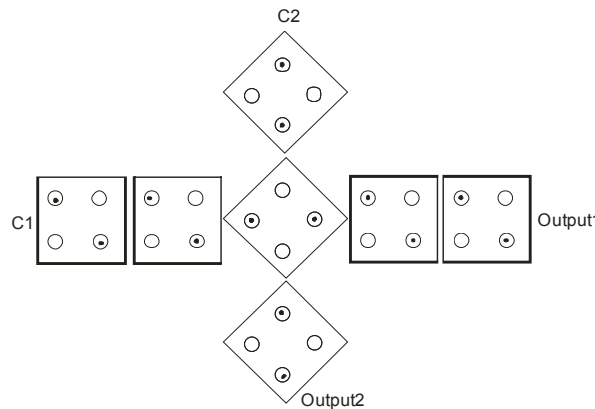
- Vrši funkcijo logične negacije
- V osnovi to dosežemo s stikanjem celic v vogalih
- C1 vhod (konstanta - gonilnik), ostale celice proste;





2.7 Brezizgubno križanje žic

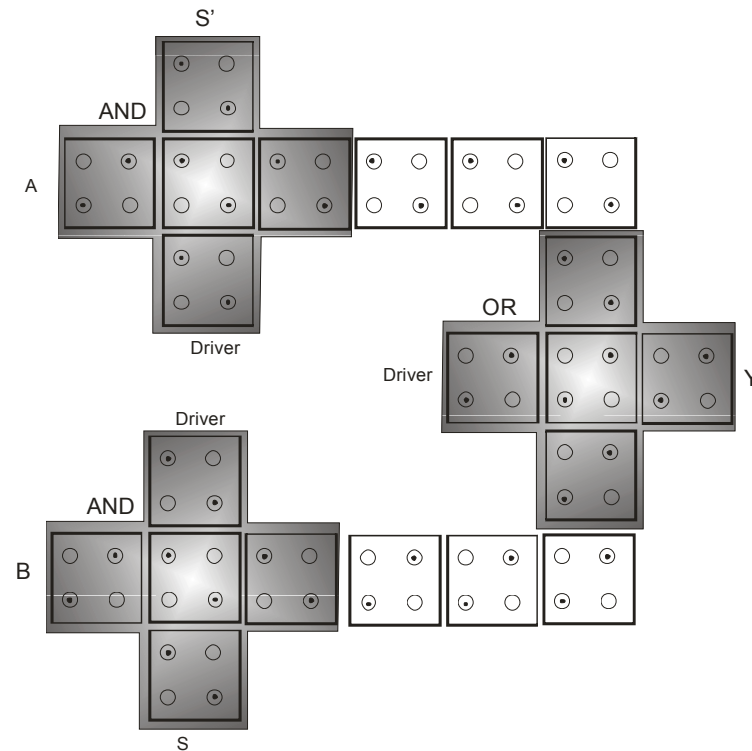
- Velika prednost QCA: omogočajo brezizgubno križanje žic, kar pomeni ob ustrezni strukturi odpravo večplastnosti povezav
- Križanje zahteva eno 90° in eno 45° žico
- C1, C2 vhodni konstanti (gonilnika), vse ostale celice se prosto polarizirajo





2.8 Zgled kompleksnejše strukture

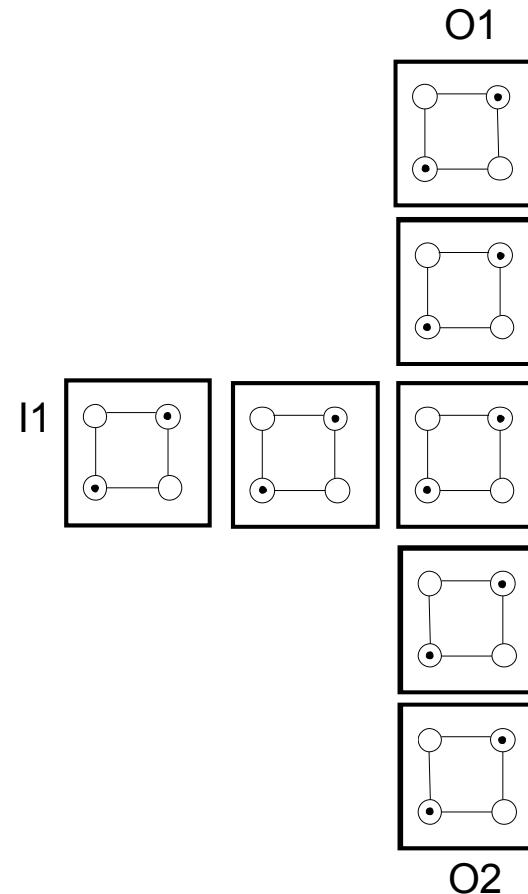
- 2x1 QCA multiplekser
($Y=AS'+BS$)





2.9 Razmnoževanje nosilca logičnega signala

- razmnoževanje signala (angl. *fan-out*)
- I1: vhodni gonilnik
- O1, O2: izhodni vrednosti, pripravljene za prenos po žici
- Ostale celice: notranje - proste





2.10 Pojem ure 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 energetska 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



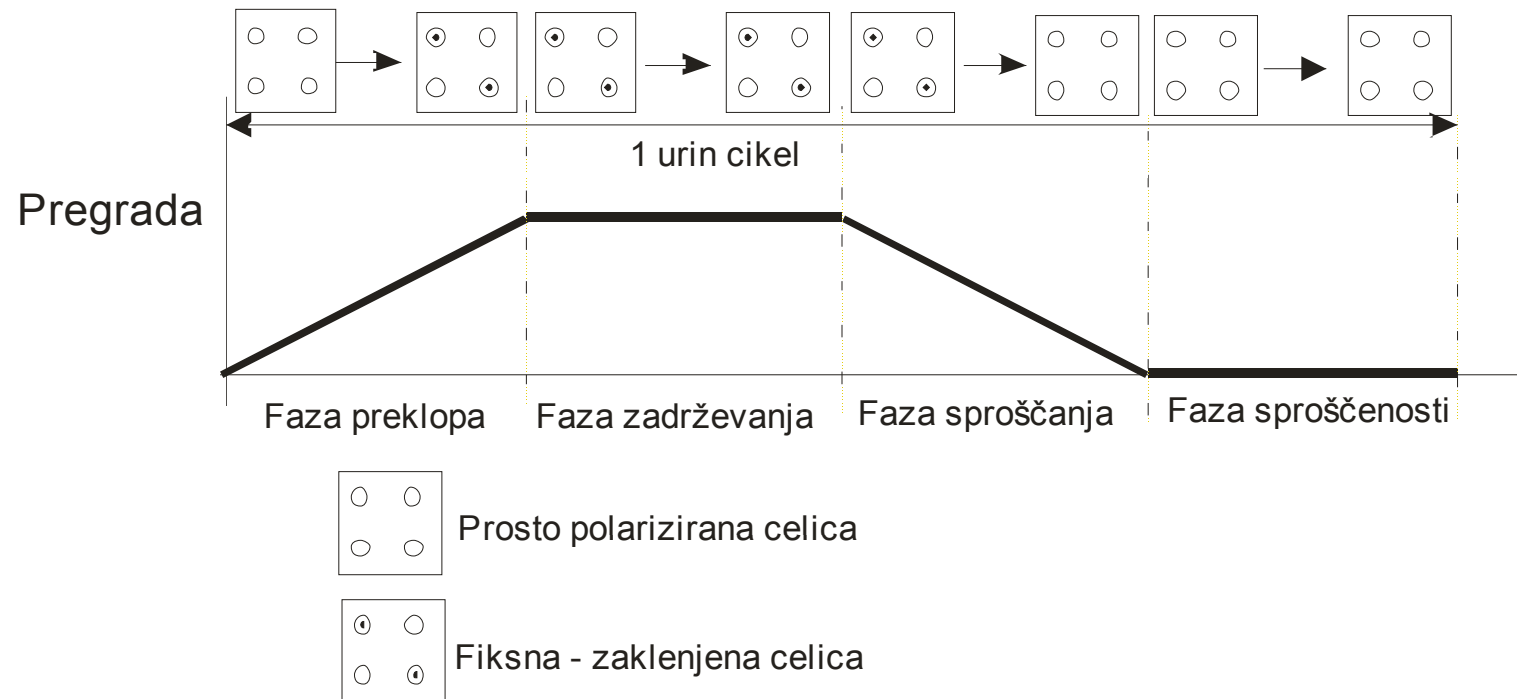
- Štiri urine faze v QCA:
 - faza preklopa (angl. *Switch*): faza dvigovanja pregrad
 - faza zadrževanja (angl. *Hold*): dvignjene pregrade
 - faza sproščanja (angl. *Release*): faza spuščanja
 - faza sproščenosti (ang. *Relax*): spuščene pregrade



- Delovanje urinih faz:
 - 1.faza: ob dvigovanju pregrad celice pričnejo iz nepolariziranih stanj prehajati v polarizirana, glede na vpliv okolice
 - 2.faza: pregrade so dvignjene, tuneliranje je onemogočeno – stanje celic se vzdržuje: te celice v tej fazi igrajo vlogo vhodnih celic – konstant
 - 3.faza: pregrade se spuščajo: 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:



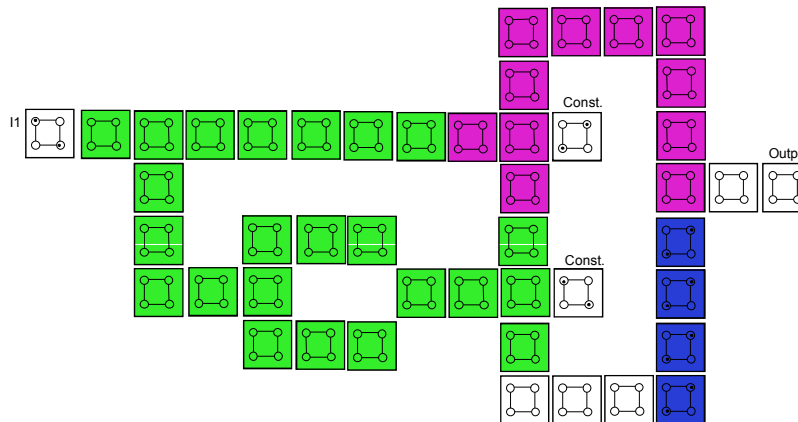


- Koncept delitve QCA strukture na posamezna urina področja:
 - vse celice v istem področju si delijo isto uro (skozi čas si delijo isto fazo)
 - fizično "sosednji" področji sta v sosednjih urinih fazah
- Naloga ure v QCA:
 - omogoča sekvenčno obdelavo logičnih funkcij (diktiranje vrstnega reda operacij)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



2.12 Realizacija pomnilne celice s strukturo QCA

- Zelena 1.faza preklopa
- Viola: 2.faza zadrževanja
- Bela: 3.faza sproščanja
- Modra: 4.faza sproščenosti (predefinirane – konstante!!!)





2.13 Povzetek QCA

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



2.14 Orodja za postavljanje QCA struktur

- QCAD-Designer, avtor: Konrad Walus (University of Calgary - Canada, University of Notre-Dame - USA)
- Uporaba na vajah za 1.seminar
- Do naslednjega srečanja si orodje instalirajte na vaših računalnikih
- Dostop:<http://www.mina.ubc.ca/qcadesigner>



2.15 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)
- [4] <http://www.qcadesigner.ca> – OPIS IN MOŽNOST DOWNLOAD-a ORODJA ZA POSTAVLJANJE QCA STRUKTUR