

2. QCA – kvantni celični avtomati

Vsebina 2.poglavja predavanj (4.UNI/RS)

Šol.letno: 2010/11

Izr.prof.dr.Miha Mraz

2.1.Vsebina poglavja

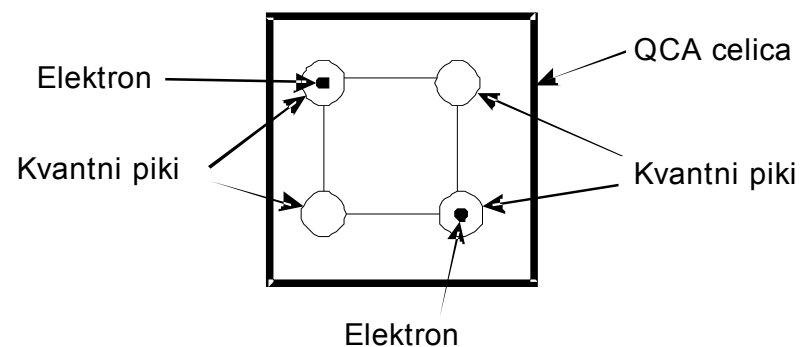
- klasično delo: struktura QCA (angl. quantum-dot cellular automata) – kvantni celični avtomat
- naša nadgradnja: struktura EQCA (angl. extended quantum-dot cellular automata) – razširjeni kvantni celični avtomat s poudarkom na trostanjskih sistemih
- obe strukturi temeljita na:
 - prostoru celic – avtomatov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

2.2. QCA struktura

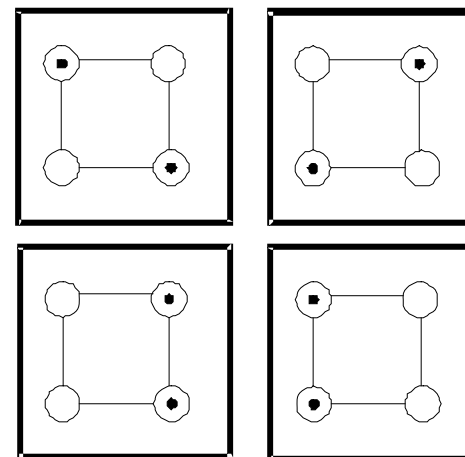
- Avtor QCA struktur (začetek 90-ih let prejšnjega stoletja): C.L.Lent (University of Notre Dame)
- Temelj QCA strukture je **celica**
- Vsako celico QCA strukture si interpretiramo kot avtomat četrkotne oblike
- Celice so v prostoru (2-D ali 3-D) poljubno razporejene, pri čemer se ne smejo prekrivati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

2.2.1. Opis posamezne QCA celice

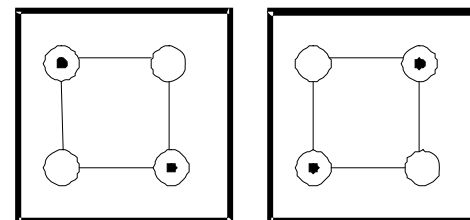
- V QCA celici imamo štiri polprevodniške kvantne pike s pozitivnim privlakom, dva elektrona in štiri tunele, preko katerih elektrona prehajata med kvantnimi pikami
- Postopek prehajanja elektrona med pikami po tunelih: tuneliranje
- Tendanca elektronov: doseganje "stabilnega stanja" pri katerem so odbojne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



- 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, spodaj pa neosnovni stanji



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



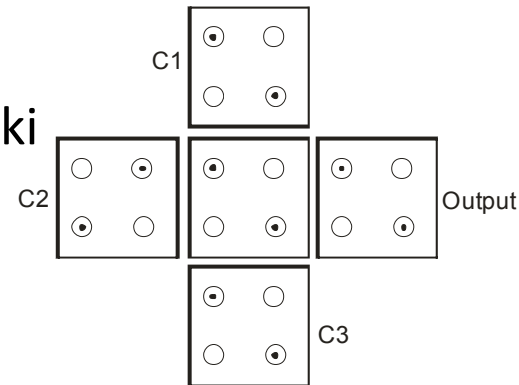
2.2.2. Fizikalne zakonitosti dinamike

- 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 proglašimo tisto z minim.elektrost.energijo ($\min(E)$)

$$E = \sum_{i \neq j} \frac{\rho_i \rho_j}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r_{ij}}$$

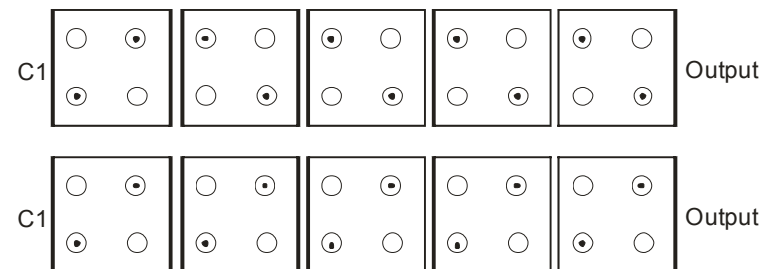
2.2.3. Majoritetna vrata v QCA strukturi

- 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($C1, C2$))
- $C1, C2, C3$ vhodne celice (angl. driverji) - konstante
- Output – izhodna prosta celica
- Neoznačena celica v sredini: prosta delovna celica
- $Output = C1C2 + C2C3 + C1C3$



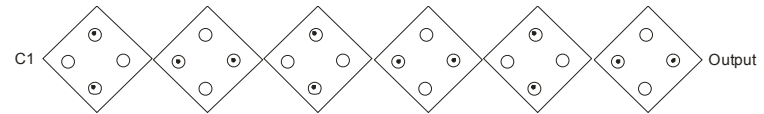
2.2.4. QCA 90° žica za prenos podatkov

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



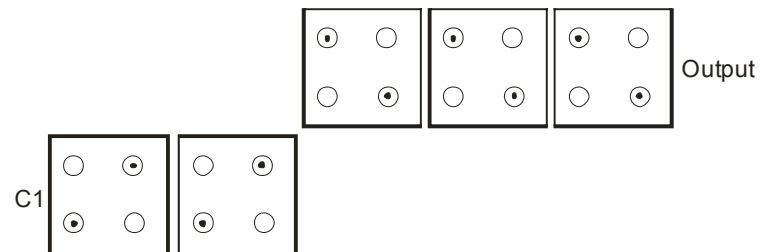
2.2.5. QCA 45° žica za prenos podatkov

- Alternirajoča 45° žica
- C1 vhod – konstanta, ostale celice proste
- Slika: OSNOVNO stabilno stanje po polarizaciji;
- Dostava log.vrednosti zahteva liho dolžine žice, sodost dostavi negirano vrednost



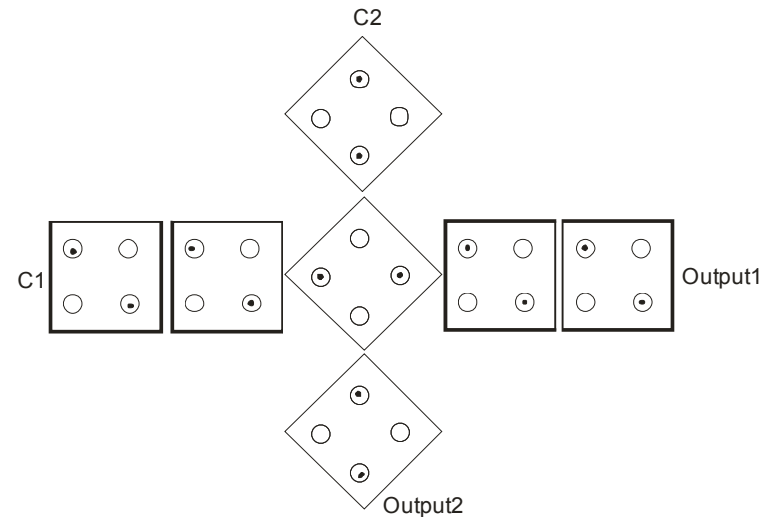
2.2.6. Funkcija logične negacije

- Vršni funkcijo logične negacije
- V osnovi to dosegamo z stikanjem celic v vogalih
- C1 vhod (konstanta), ostale celice proste;



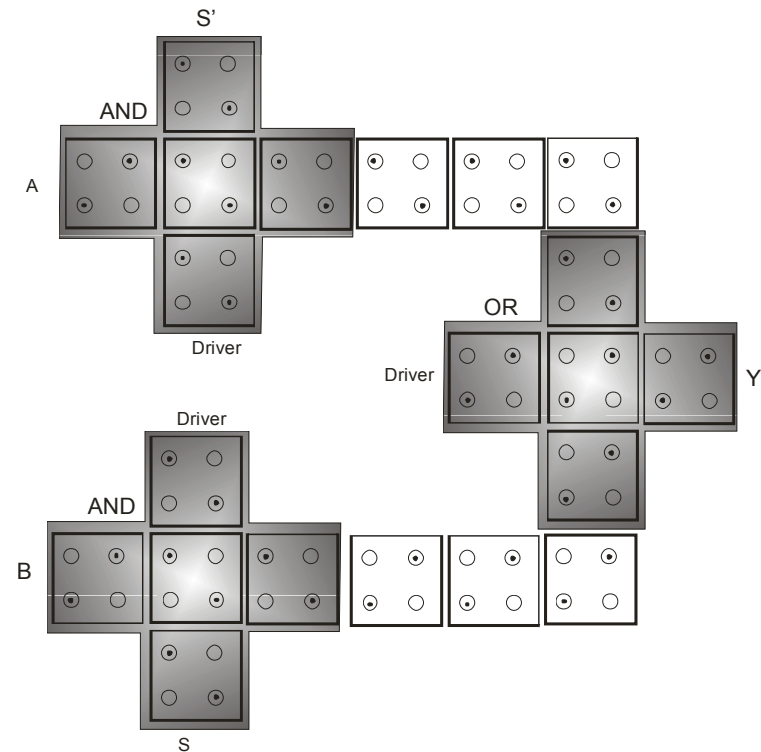
2.2.7. Brezizgubno križanje žic

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



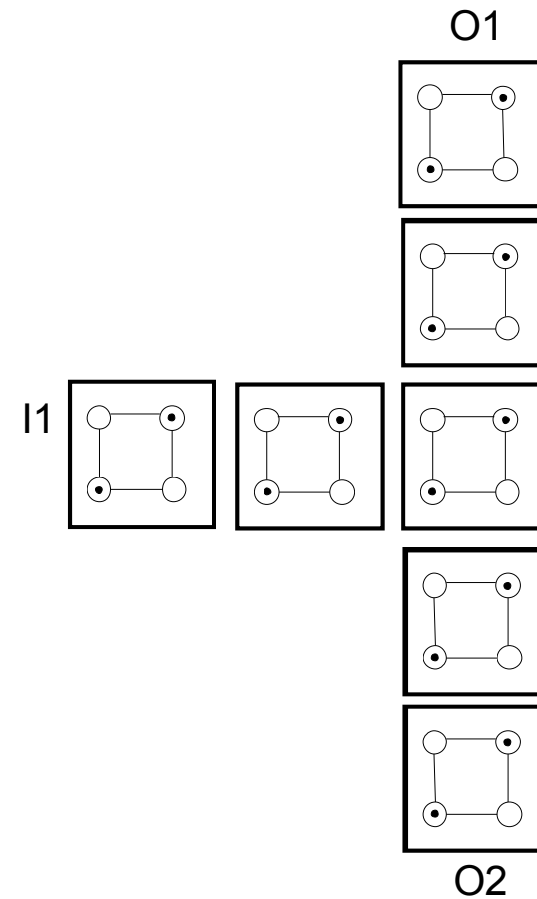
2.2.8. Zgled kompleksnejše strukture

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



2.2.9. Razmnoževanje signala

- razmnoževanje signala (angl. fan-out)



2.2.10. Pojem ure v QCA

- Doslej: *vhodne celice* (driverji) fiksni, *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 energetske minimum, kar pomeni, da globalnega ne bo dosegla -> logična napaka v procesiranju -> napačen odziv strukture v primerjavi z željeno prevajalno funkcijo
- V namen izogibu slednjemu vpeljava ure v obliki električnega polja nad množicami celic (brez neposrednih povezav do celic) -> namen kontrole (opdiranja/zapiranja) pregrad – tunelov med pikami v posameznih kvantnih celicah
- Vpeljava ure omogoča “adiabatnost” preklopa

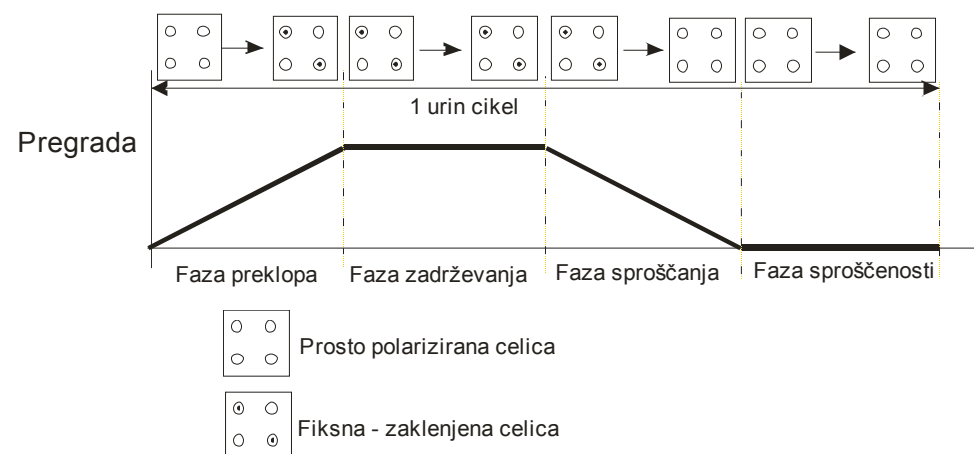
2.2.11. Vpeljava ure v QCA

- 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

2.2.12. Delovanje urinih faz

- Delovanje:
 - 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

2.2.13 Shema menjavanja urinih faz

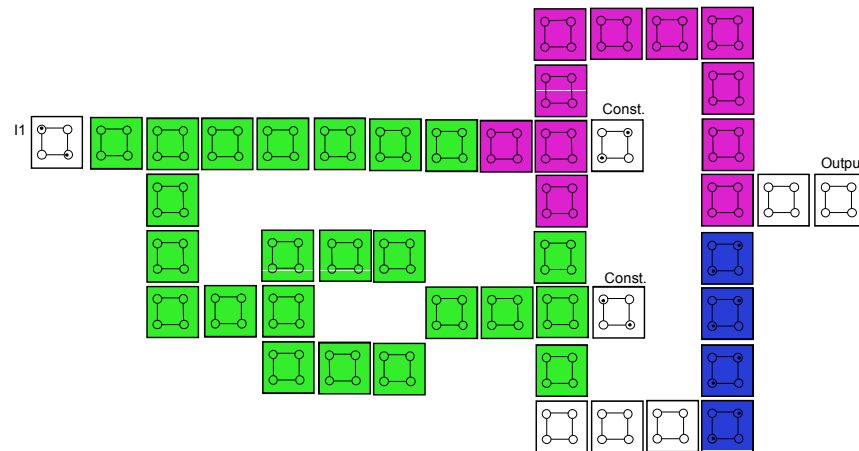


2.2.14 Delitev QCA strukture na posamezna urina področja

- Koncept:
 - 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 – omogoča diktiranje vrstnega reda operacij
 - omogoča ojačenje (v 2.fazi zadrževanja) – analogija močnostnemu ojačanju v klasičnih vezjih

2.2.15. Realizacija pomnilne celice s strukturo QCA

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



2.2.16. 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 obema stanjema iz česar sledi velik vpliv okolja (T) na strukture

2.2.17 Orodja za postavljanje QCA struktur

- Avtor: Konrad Walus (University of Calgary - Canada, University of Notre-Dame - USA)
- Uporaba na vajah za 1.seminar

2.2.18. 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

[2] <http://www.qcadesigner.ca> — OPIS IN MOŽNOST DOWNLOAD-a ORODJA ZA POSTAVLJANJE QCA STRUKTUR

Prvi vir dosegljiv kot PDF datoteka na:

<http://lrs.fri.uni-lj.si/poucevanje/ont>

2.3. Razširjeni kvantni celični avtomati

- Angl: extended quantum-dot cellular automata – EQCA
- Osnovni cilj je postaviti strukture zmožne ne samo dvovrednostnih, temveč tudi več vrednostnih logičnih operacij
- Pozabljeni zgodovinski termin: analogue computing

2.3.1. Motivacija za trovrednostno logiko

- angl. Ternary computing (D.E.Knuth – prof.emerit.: Stanford University)
- prednosti trojiškega zapisa (glej vir [1] v virih konec razdelka 2.3.):
 - trditev: baza 2 je premajhna, 10 prevelika, 3 najbližje idealu
 - štetje: 0,1,2,10,11,12,20,21,22,100,101....
 - $19_{10}=10011_2=201_3$
 - splošno: $d_3r^3+d_2r^2+d_1r^1+d_0r^0$
 - r – baza, d – digiti (kodi) n vrednostnega zapisa
 - vrednostni zapisi glede na n niso ekvivalentni

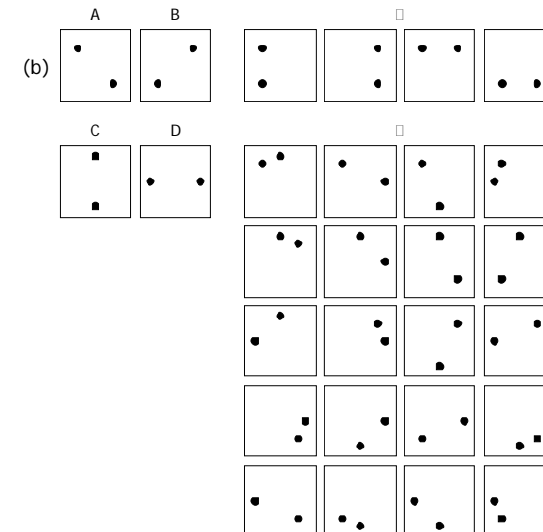
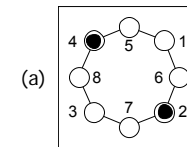
- desetiški zapis = (?) štetje na prste
- dvojiški zapis: ustreza tehnologiji izvedbe logičnih operacij, ki je izšla iz dvostanjskih sistemov
- trojiški zapis: najefektivnejši – najekonomičnejši zapis
- unarni zapis: $1.000.000 = 111111.....1$
- minimizacija dolžine zapisa vodi v eksplozijo potencialne zaloge vrednosti digitov
- minimizacija potencialne zaloge digitov vodi v eksplozijo dolžine zapisa
- idealen zapis: ustrezno razmerje med dolžino zapisa (w) in velikostjo potencialne zaloge digitov – kodov (r)

- cilj: doseganje $\min(r^*w)$, pri zadrževanju konstantne vrednosti r^w
- problem lažje analitično rešljiv, če $r, w \in R$: analitična rešitev nam za rešitev ponuja $r=e$ (približno 2,718)
- glede na to, da je 3 najbližje po vrednosti e , v večini primerov predstavlja najustreznejšo izbiro vrednostnega izpisa

- družina računalnikov Setun (bivša Sovjetska zveza):
 - Moscow state University 1958
 - Balanced ternary computer (-1,0,1)
 - Tryte (\equiv byte): 6 trits (\cong 9,5 bits)
 - Proizvedenih 50 enot
- Ternary arithmetic [2]:
 - Predstavitev velikih števil z manj ciframi (manjše enote obdelave (npr. 1 zložni dostopi do pomnilnika), manjša kompleksnost priključkov)
 - Od logike do tranzistorskih implementacij

2.3.2. tQCA celica kot konkreten primer EQCA

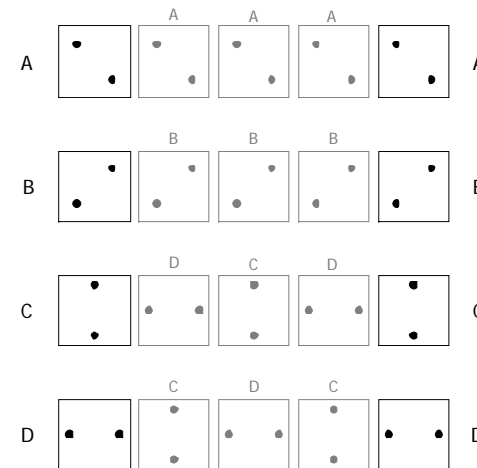
- Ternary QCA (trojiški QCA) [3]
- Cilj: posplošitev celice, ki se bo v doslej danih pogojih obnašala kot klasična Lentova, v dodatnih razširjenih pogojih pa po konceptu trovrednostne logike
- Slika zgoraj: osem točkovna celica z dvema elektroni, spodaj A, B, C, D kot stabilna stanja in preostala “nedosegljiva” stanja v tQCA celicah
- Modeliranje je temeljilo na predhodno prikazanih fizikalnih temeljih kvantne fizike



- Štiri pike na istih legah, kot v Lentovi celic
- Nove štiri pike ponujajo dve novi diagonalni legi elektronov
- Imena “diagonalnih leg”
 - A: logična “0” po Lentu
 - B: logična “1” po Lentu
 - C: nova vertikalna lega
 - D: nova horizontalna lega

2.3.3. “Dinamika” linije v strukturah tQCA

- Linija – žica kot možnost transfera podatkov v tQCA strukturah
- Delovanje:
 - prenos A in B enak kot pri Lentu
 - prenos C in D je alternirajoč: za transfer uporabljamo samo linije lihih dolžin

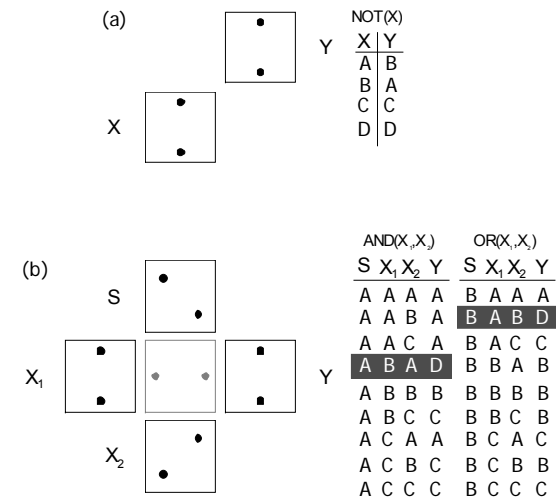


2.3.4. Obravnava štirih možnih stanj v tQCA celici

- Zaradi kompleksnosti simulacijskih izračunov se vrednosti D (horizontalna lega elektronov) odpovemo kot vrednosti na vhodnih celicah
- Hipoteza: vrednosti D nikdar ne dobimo kot vrednosti na izhodnih celicah → na vseh in izhodih pričakujemo le vrednosti {A,B,C} → množico proglasimo za trovrednostni sistem $\{0,1,1/2\}$, seveda le na vhodnih celicah in izhodih; vrednost D dopuščamo kot vrednost v “notranjih” celicah strukture
- S prehodom na trovrednostni sistem (trovrednostna logika) se opremo na trovrednostno logično teorijo po Luksiewicz-u

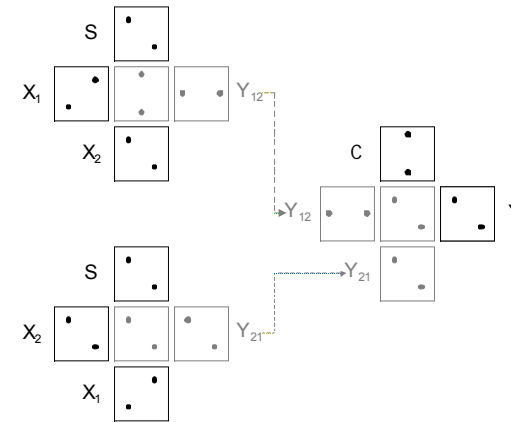
2.3.5. Trovrednostna negacija, konjunkcija in disjunkcija

- Negacija (zgoraj): deluje korektno (tako po Lentu, kot tudi v primeru C, D nas ne zanima)
- AND, OR (spodaj): S vrši funkcijo izbire med AND in OR in je tako možna vrednost na vhodu le 0 ali 1; vsi funkcijski izhodi ustrezajo logičnim tabelam po Lukasiewiczu, razen v primerih AND(1,0) in OR (0,1), ko funkcije ne delujeta pravilno; še več na izhodu dobimo neželjeni D
- pade hipoteza, da bomo večinska majoritetna vrata le razširili (glede na vrata Lenta)



2.3.6. Popravki majoritetnih vrat

- Potrebna je “dopolnitev” majoritetnih vrat;
- Rešitev na sliki na desno: uporabimo troja majoritetna vrata, s čimer dosežemo obnašanje “po” Lukasiewicz-evi trovrednostni pravilnostni tabeli; pomen: detekcija in eliminacija vrednosti D
- Spodaj: pravilnostna Lukasiewicz-eva tabela



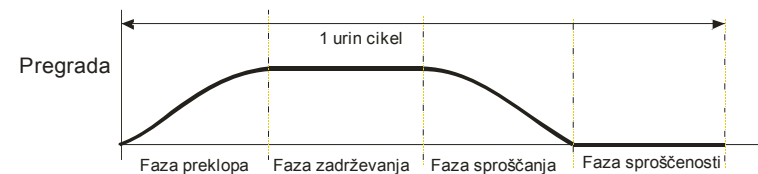
S, X, X_1	S, X, X_2, Y_{12}	S, X_2, X_1, Y_{21}	C, Y_{12}, Y_{21}, Y	Y
0 0 0	A A A A	A A A A	C A A A	0
0 0 1/2	A A C A	A C A A	C A A A	0
0 0 1	A A B A	A B A A	C A D A	0
0 1/2 0	A C A A	A A C A	C A A A	0
0 1/2 1/2	A C C C	A C C C	C C C C	1/2
0 1/2 1	A C B C	A B C C	C C C C	1/2
0 1 0	A B A D	A A B A	C D A A	0
0 1 1/2	A B C C	A C B C	C C C C	1/2
0 1 1	A B B B	A B B B	C B B B	1
1 0 0	B A A A	B A A A	C A A A	0
1 0 1/2	B A C C	B C A C	C C C C	1/2
1 0 1	B A B D	B B A B	C D B B	1
1 1/2 0	B C A C	B A C C	C C C C	1/2
1 1/2 1/2	B C C C	B C C C	C C C C	1/2
1 1/2 1	B C B B	B B C B	C B B B	1
1 1 0	B B A B	B A B D	C B D B	1
1 1 1/2	B B C B	B C B B	C B B B	1
1 1 1	B B B B	B B B B	C B B B	1

2.3.7 Preostali nedelujoči gradniki

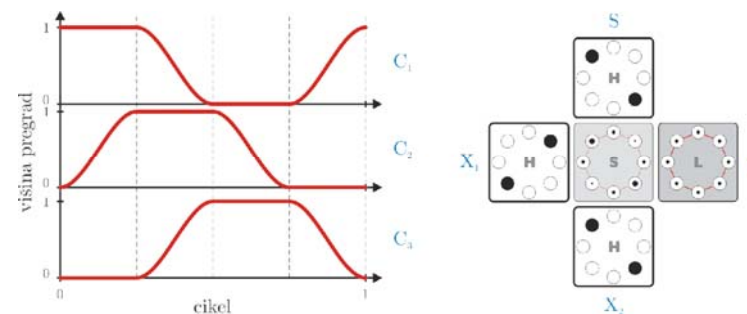
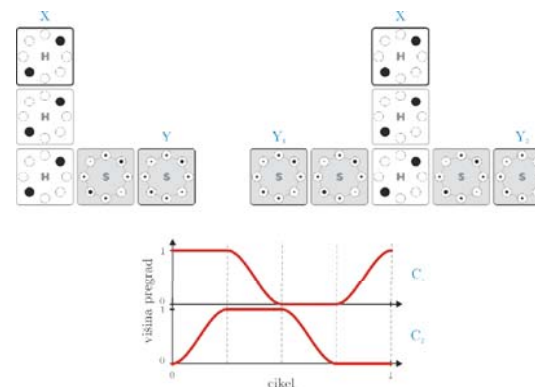
- Kotna linija
- Razvejitvena linija

2.3.8. tQCA ob prisotnosti adiabatnega preklopa (ure)

- Zaradi prej naštetih težav zopet vpeljemo 4.fazni urni cikel [4];
- S tem dosežemo sinhronizacijo prenosa podatkov
- Nova oblika funkcije urinega signala (zaradi prehitrega prehoda celic v fazo preklopa



- S tem rešimo probleme delovanja kotne in razvejitvene linije, ki pri urno nenadzorovanih tQCA nista delovali (glej gornjo sliko desno) in delovanja majoritetnih vrat (glej spodnjo sliko desno)



2.3.9 Priporočeni viri

- [1] B.Hayes: Third Base, American Scientist, Vol.89, Num.6
- [2] <http://www.trinary.cc/>
- [3] I.Lebar Bajec, M.Mraz: Večstanjsko procesiranje v strukturah kvantnih celičnih avtomatov. *Elektroteh. vestn.*, 2006, letn. 73, no. 2/3, str. [105-110]
- [4] P.Pečar: Uporaba adiabatnega pristopa pri realizaciji trojiškega procesiranja na osnovi kvantnih celičnih avtomatov (mag.delo na FRI)