

POT V NANOELEKTRONIKO

in

TRENDI TEHNOLOŠKEGA RAZVOJA

SONČNIH CELIC NOVIH GENERACIJ

Benjamin Lipovšek, Franc Smole, Janez Krč, Marko Topič

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška cesta 25, SI-1000 Ljubljana



Laboratorij za Fotovoltaiško in Optoelektroniko

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za Elektrotehniko

Tržaška cesta 25
1000 Ljubljana



Vodja

prof. dr. Marko Topič

Raziskovalci

prof. dr. Franc Smole
izr. prof. dr. Janez Krč
doc. dr. Marko Jankovec
dr. Kristijan Brecl
dr. Urša Opara Krašovec
dr. Boštjan Glažar
dr. Andrej Čampa
dr. Marko Berginc
dr. Mateja Hočevar
dr. Benjamin Lipovšek

Mladi raziskovalci

Matevž Bokalič
Marija Drev
Miha Filipič
Sena Madunič
Gašper Matič
Martin Sever
Tjaša Vidmar

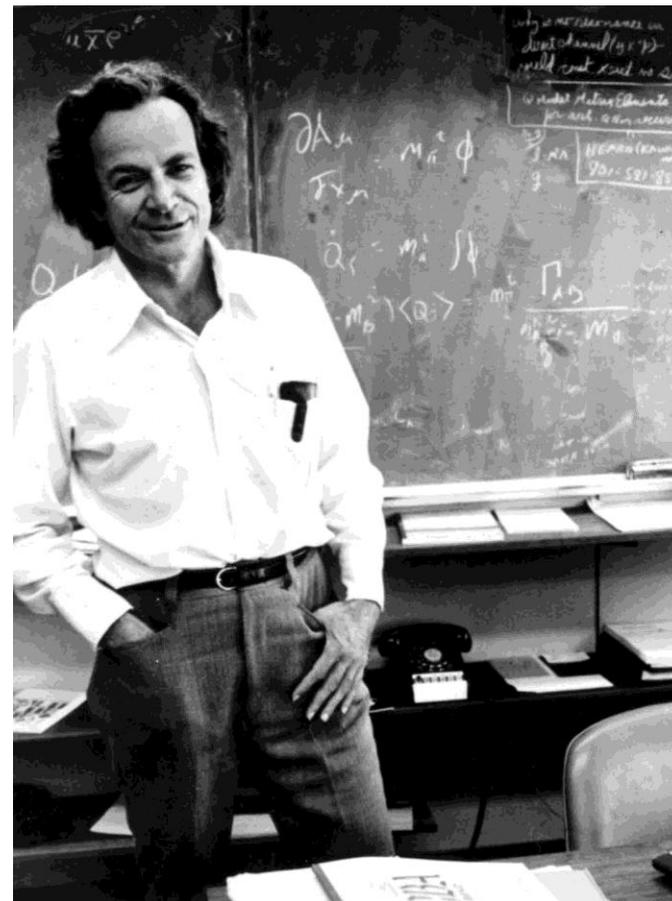
Tehnična sodelavca

Jože Stepan
Marijan Žurga

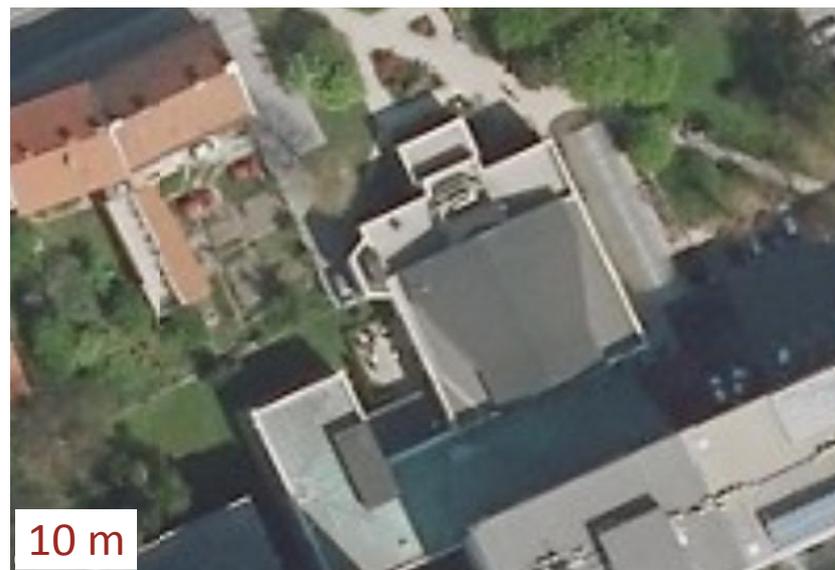
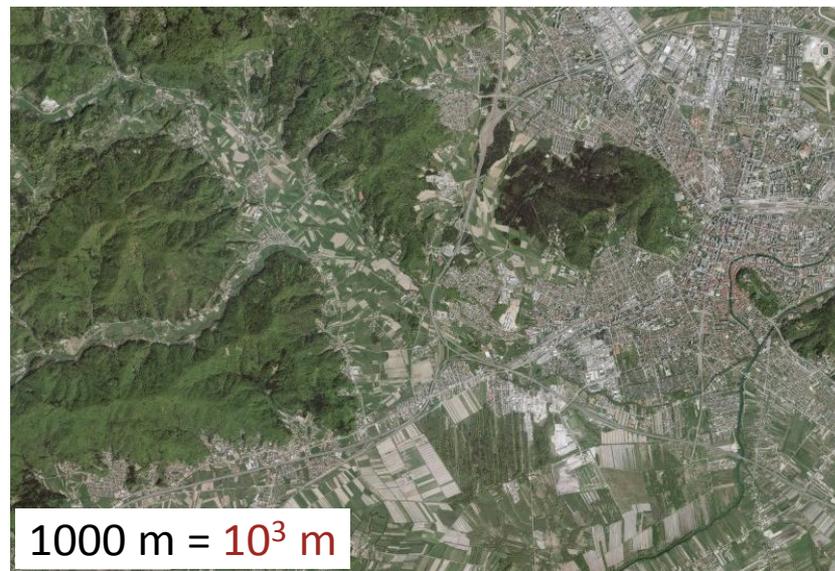
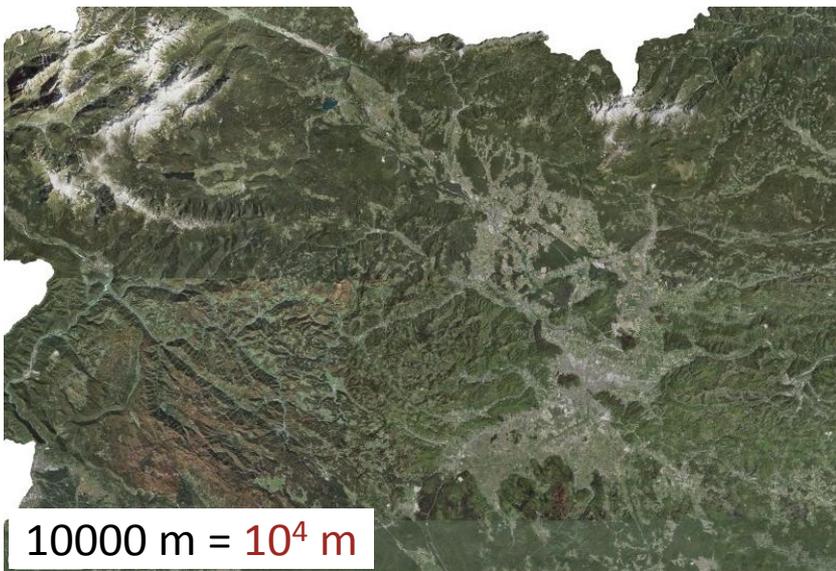
„There's plenty of room at the bottom“

Richard Feynman, 1959

- Vplivno vizionarsko predavanje v Pasadeni leta 1959 se šteje kot konceptualni uvod v obdobje nanotehnologij.
- Izziv: „Kako zapisati celotnih 24 knjig Enciklopedije Brittanice na glavico bučike?“
- Feynman predstavi potrebo po razvoju nanotehnoloških orodij ter odpre vprašanje o možnosti manipulacije snovi na atomarnem nivoju: „Kako bi bilo, če bi lahko premikali posamezne atome ter jih razporejali, kot bi želeli?“



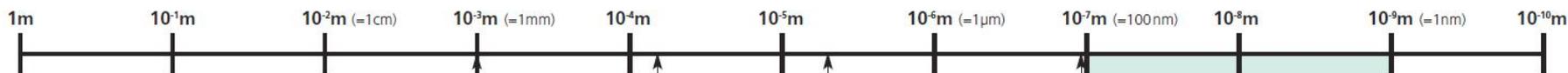
vir: American Institute of Physics



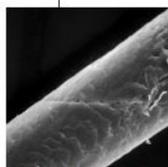
Prostor „na dnu“



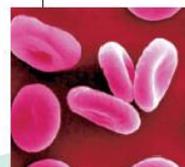
Football (approximately 22 cm)

carbon 60 (0.7 nm)
R. Drautz

Pet flea (1 mm)

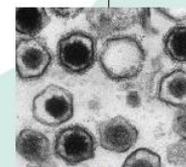


Human hair (80 µm)



Red blood cells (7 µm)

Credit: D Marshall & D Gregory/Wellcome Photo Library



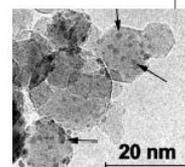
Icosahedral virus particles (150nm)

Biomedical Electron Microscopy Unit, Newcastle University.



Bundle of single-walled carbon nanotubes (approximately 1.4 nm wide, several mm long)

A Thess et al, Science 273, 483, 1996

Platinum/Titanium dioxide particles (Platinum particles less than 3 nm in diameter are indicated by arrows on titanium dioxide)
R Strobel et al, J Catal 222, 296, 2003

Each letter in the logo is about 5 nm from top to bottom.

Image reproduced by permission of IBM Research, Almaden Research Center. Unauthorized use not permitted.



Strand of DNA (approximately 2 nm wide)

Da bi zapisali celotno Enciklopedijo Brittanico na glavico bučike, bi morali velikost besedila pomanjšati za 25.000x. Torej bi bila ena črka velika nekaj 10 nm. → **Dovolj je prostora!**

vir: The Royal Society and Royal Academy of Engineering

Fizikalni pojavi „na dnu“

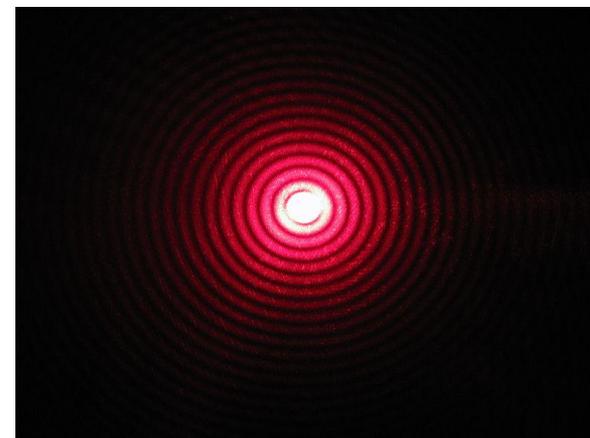
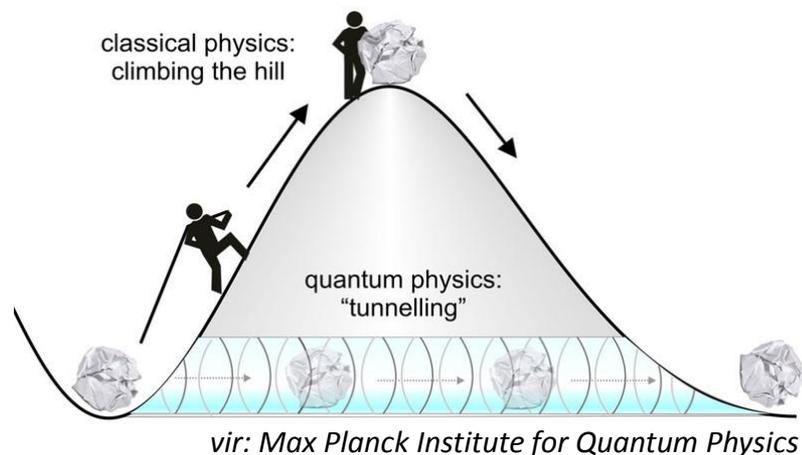
< 100 nm

▪ Elektronika

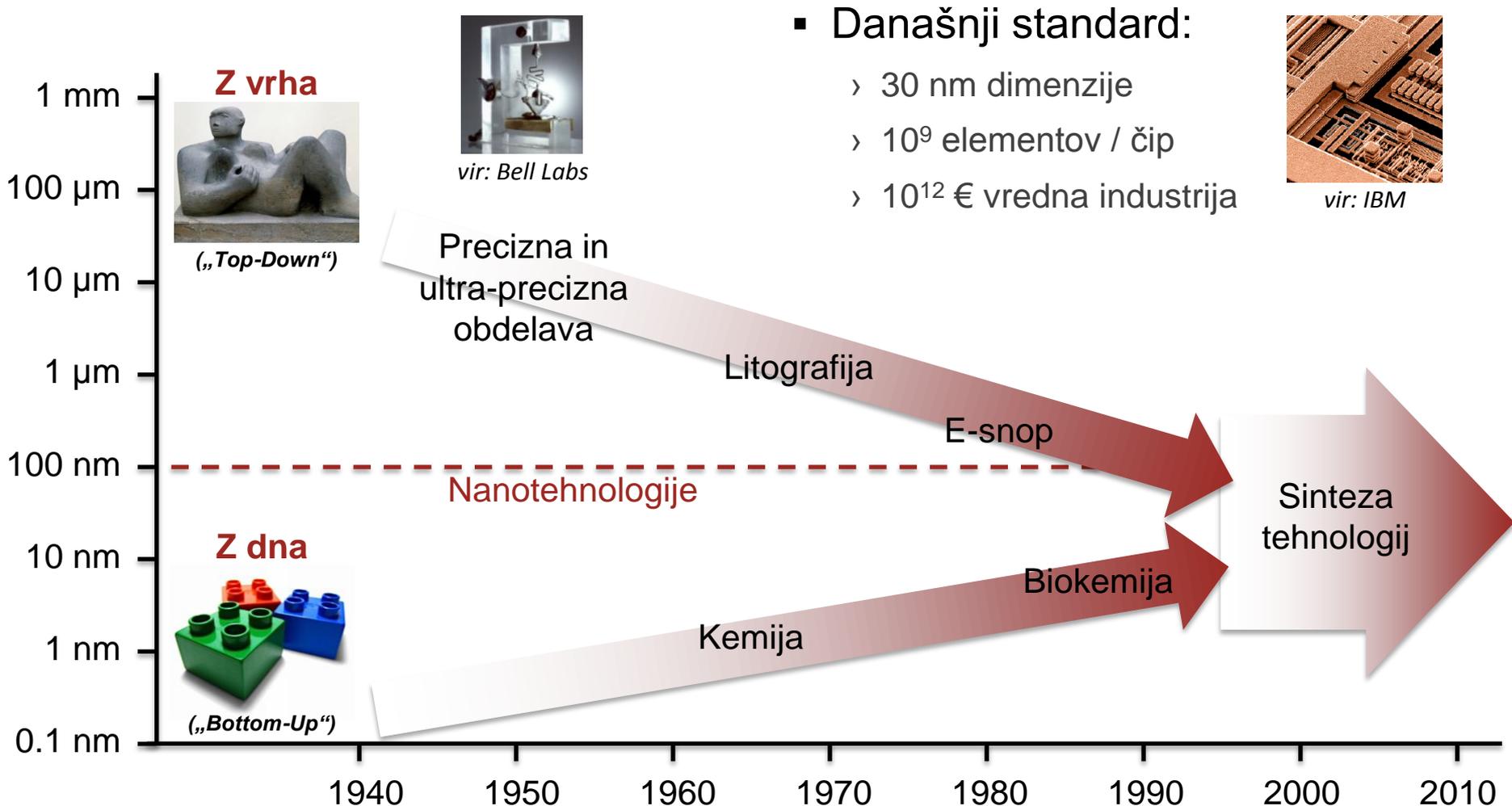
- › Balistični transport
- › Kvantno tuneliranje

▪ Optika

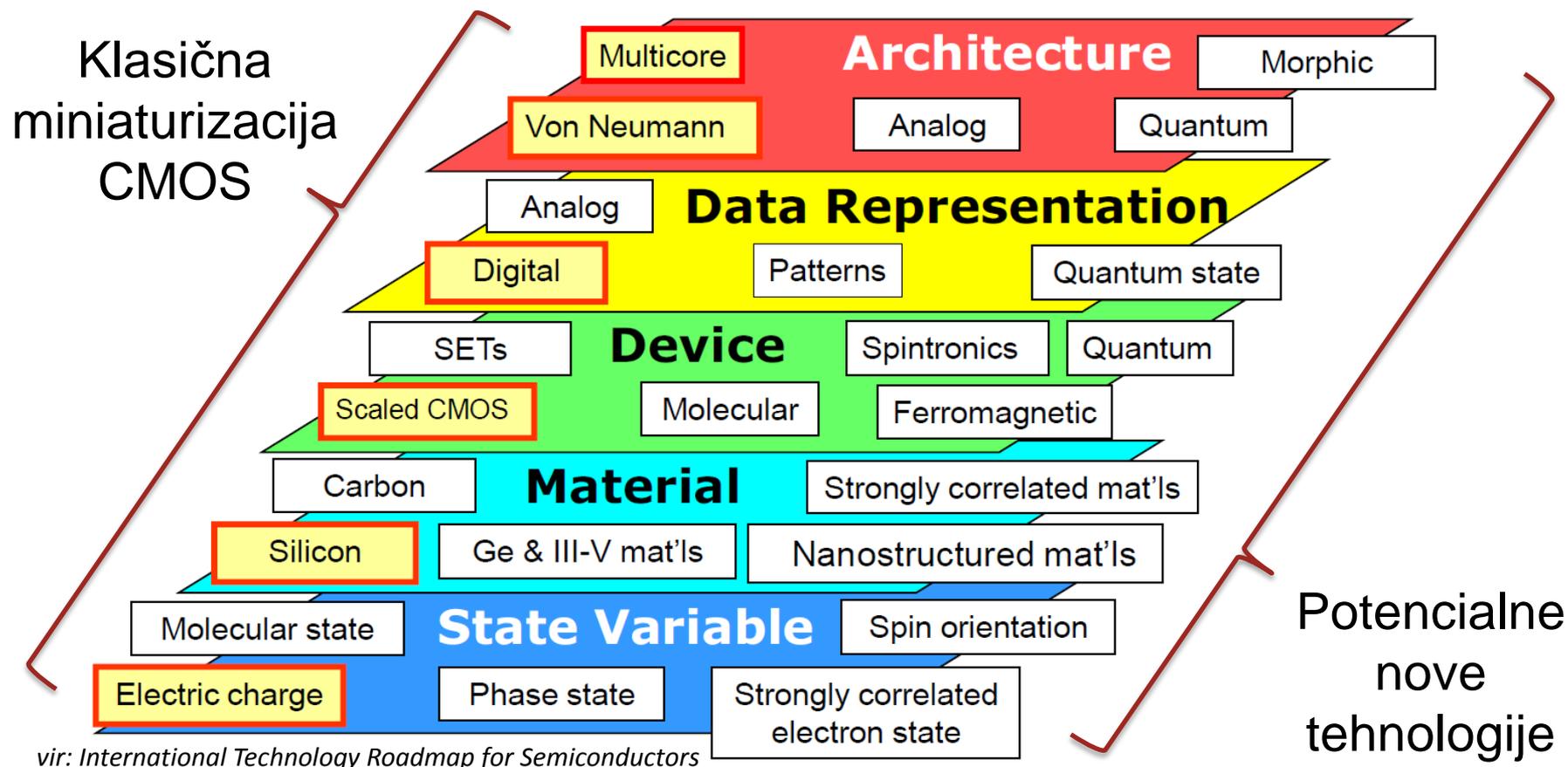
- › Uklon svetlobnega valovanja
- › Ne-popolni notranji odboj



Postopki izdelave nanostruktur

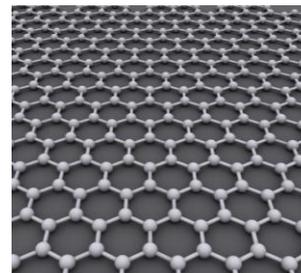


Taksonomija elektronike danes in jutri

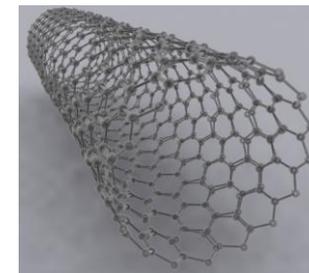


Grafen in ogljikove nanocevkke (CNT)

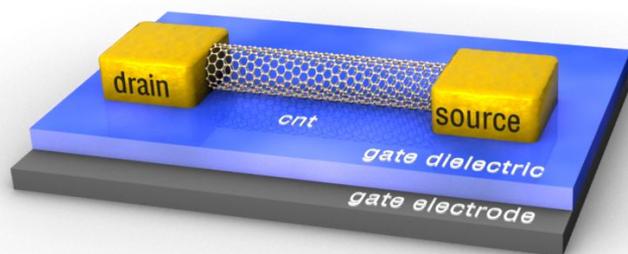
- Ključne lastnosti:
 - › Izjemna trdnost, majhna teža
 - › Visoka mobilnost za elektrone in vrzeli
- Aplikacije v nanoelektroniki:
 - › Električne povezave med elementi
 - › FET tranzistorji (CNT-FET)
 - › Pomnilniške celice (Nano-RAM)



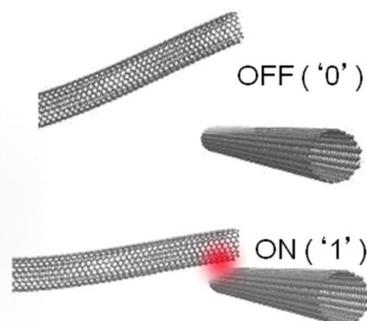
Grafen



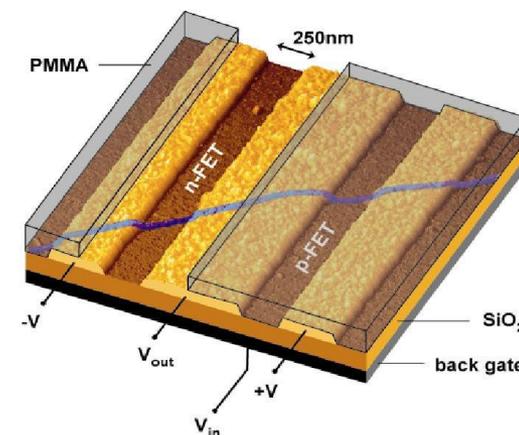
Ogljikova nanocevka



FET tranzistor s CNT kanalom



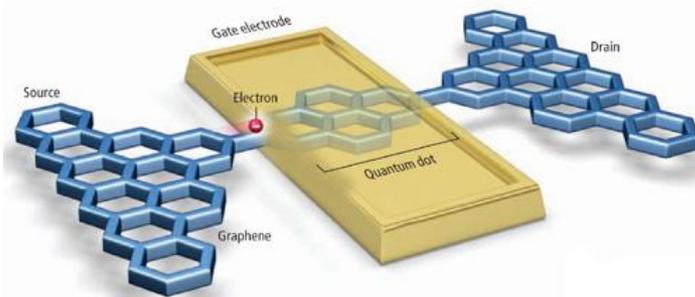
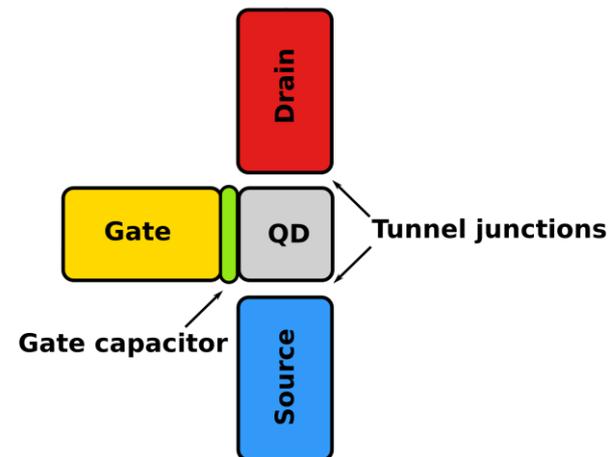
Nano-RAM, vir: Nantero



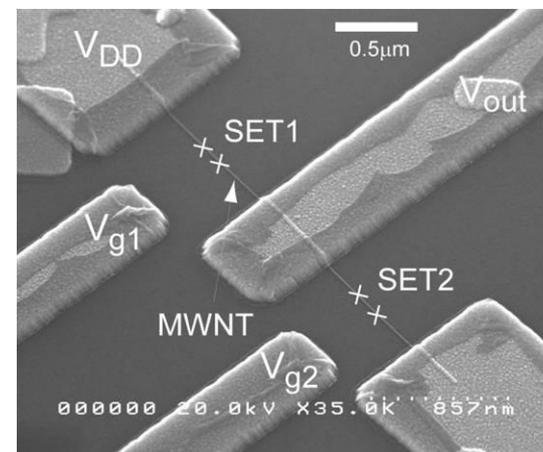
CNT-FET inverter, vir: IBM

Eno-elektronski tranzistor (SET)

- Ključne lastnosti:
 - › Občutljivost na nivoju enega elektrona
 - › Izjemno nizka poraba moči
- Aplikacije v nanoelektroniki:
 - › Logična vezja s SET tranzistorji
 - › Detektorji (električni naboj, IR svetloba)
 - › Pomnilniške celice



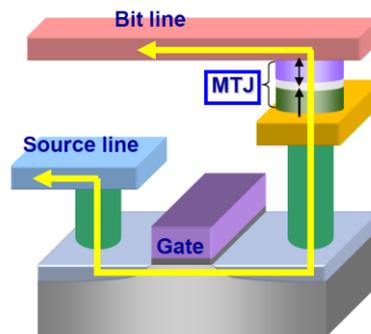
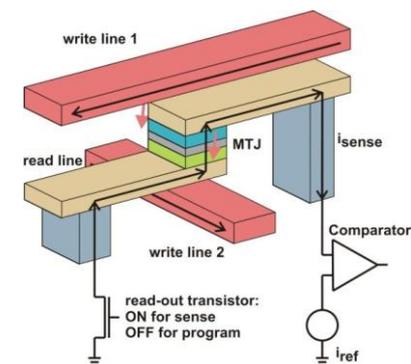
SET iz grafena, vir: *Splashlight*



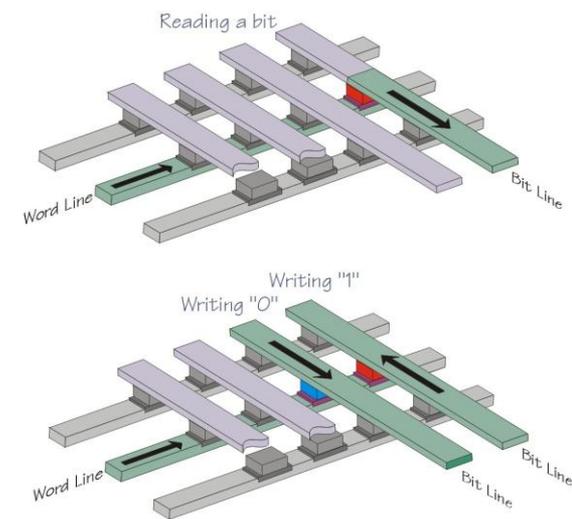
SET inverter, vir: *Advanced Device Laboratory*

Magnetno-rezistivni pomnilnik (MRAM)

- Ključne lastnosti:
 - › Trajnost, stabilnost shranjene informacije
 - › Hitro branje/pisanje, neomejeno število ciklov
 - › Visoka stopnja integracije (en tranzistor na celico)
- STT-MRAM („*Spin-Transfer Torque MRAM*“):
 - › Možnost paralelnega zapisovanja
 - › Brez napak v zapisu
 - › Minimalna poraba moči

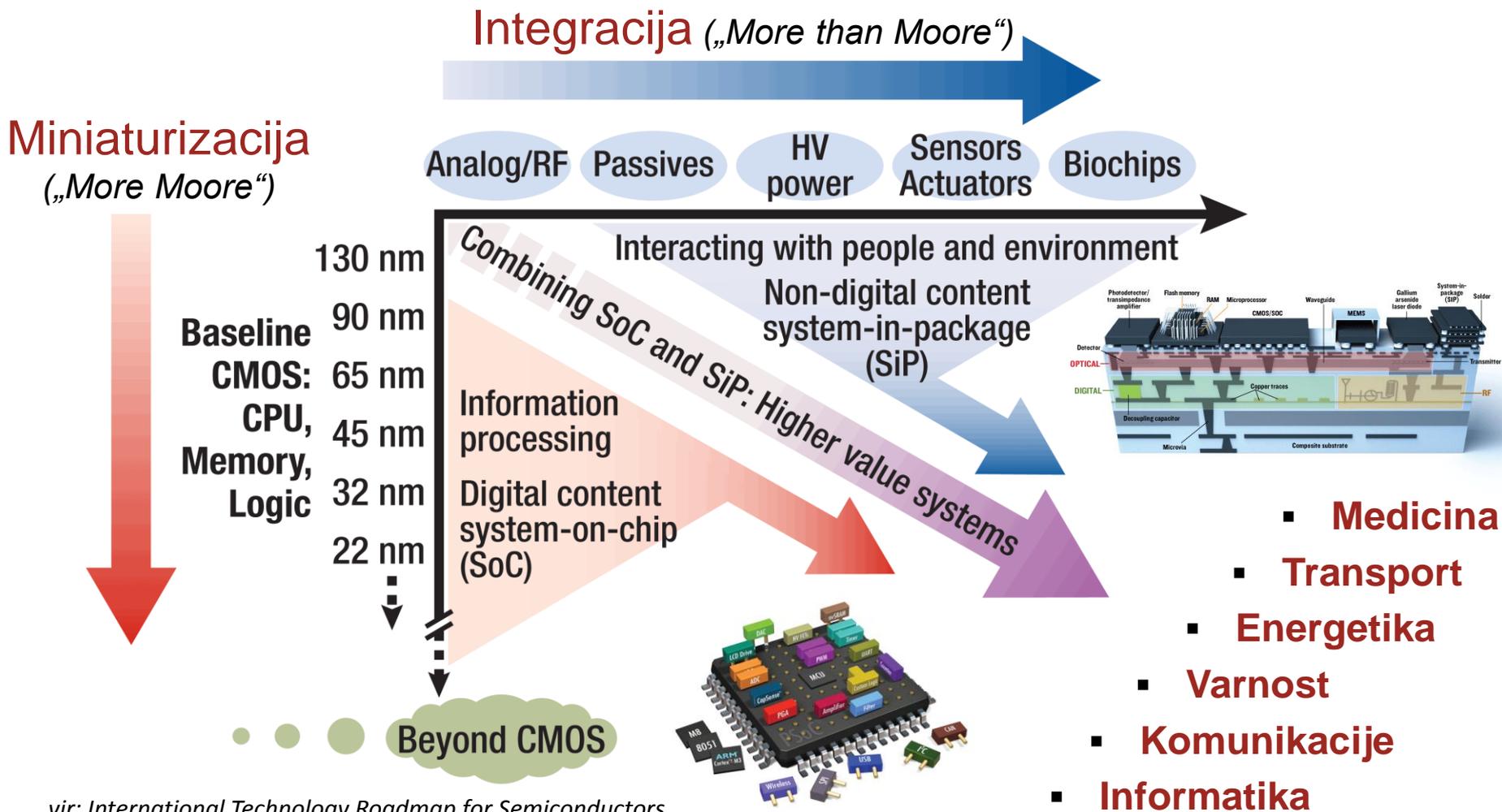


STT-MRAM



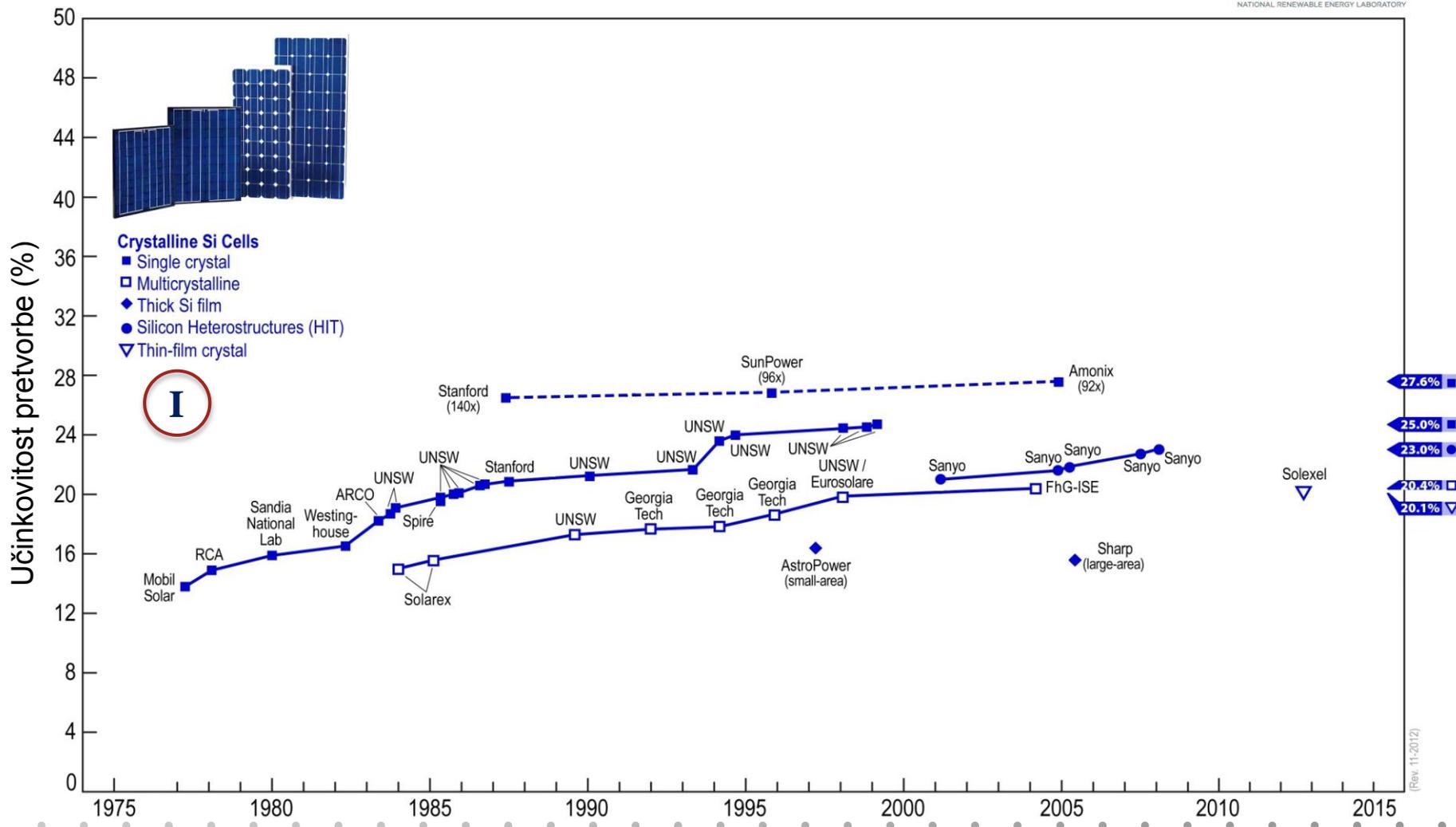
Branje / pisanje

Trendi miniaturizacije in integracije

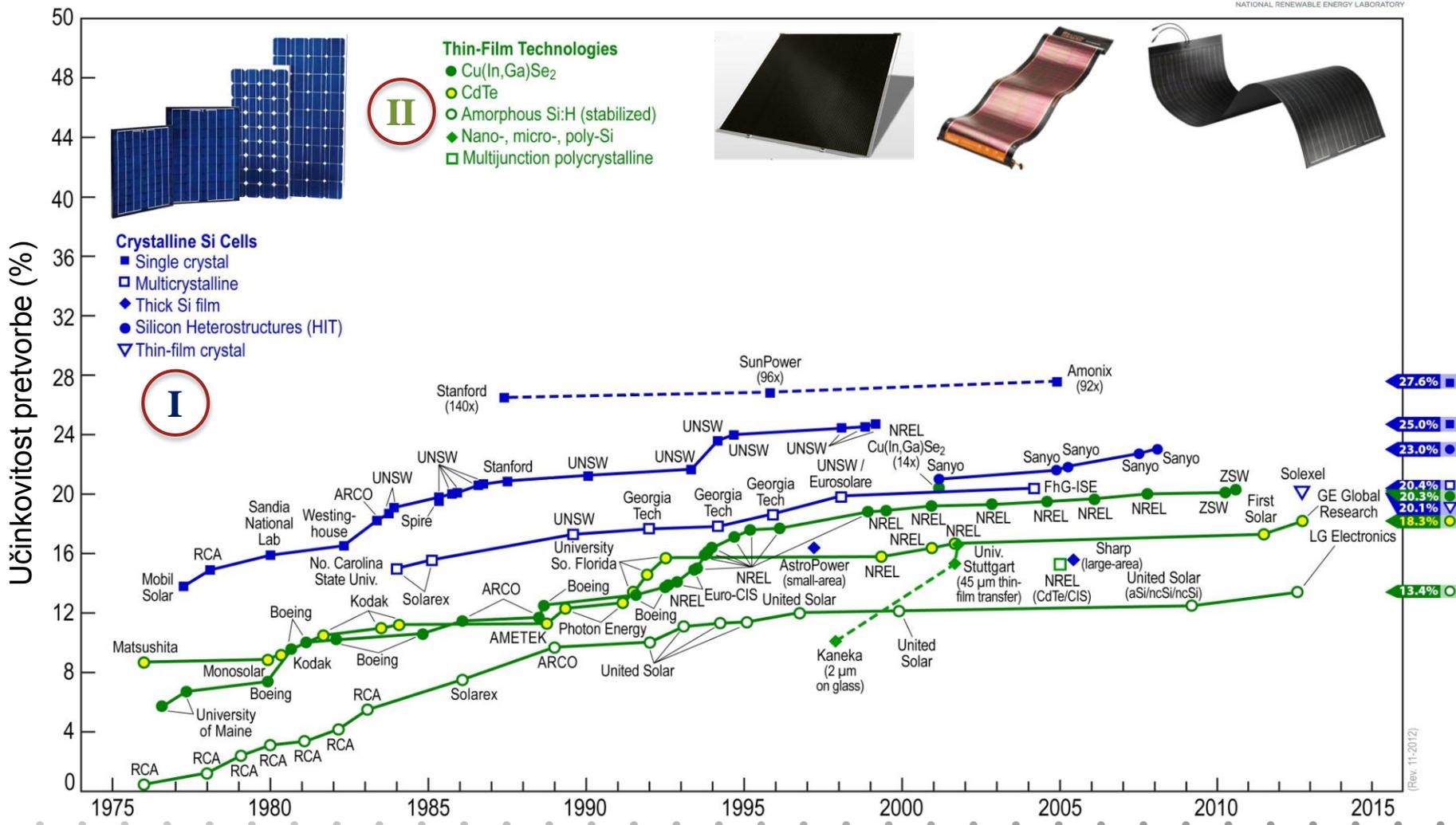


vir: International Technology Roadmap for Semiconductors

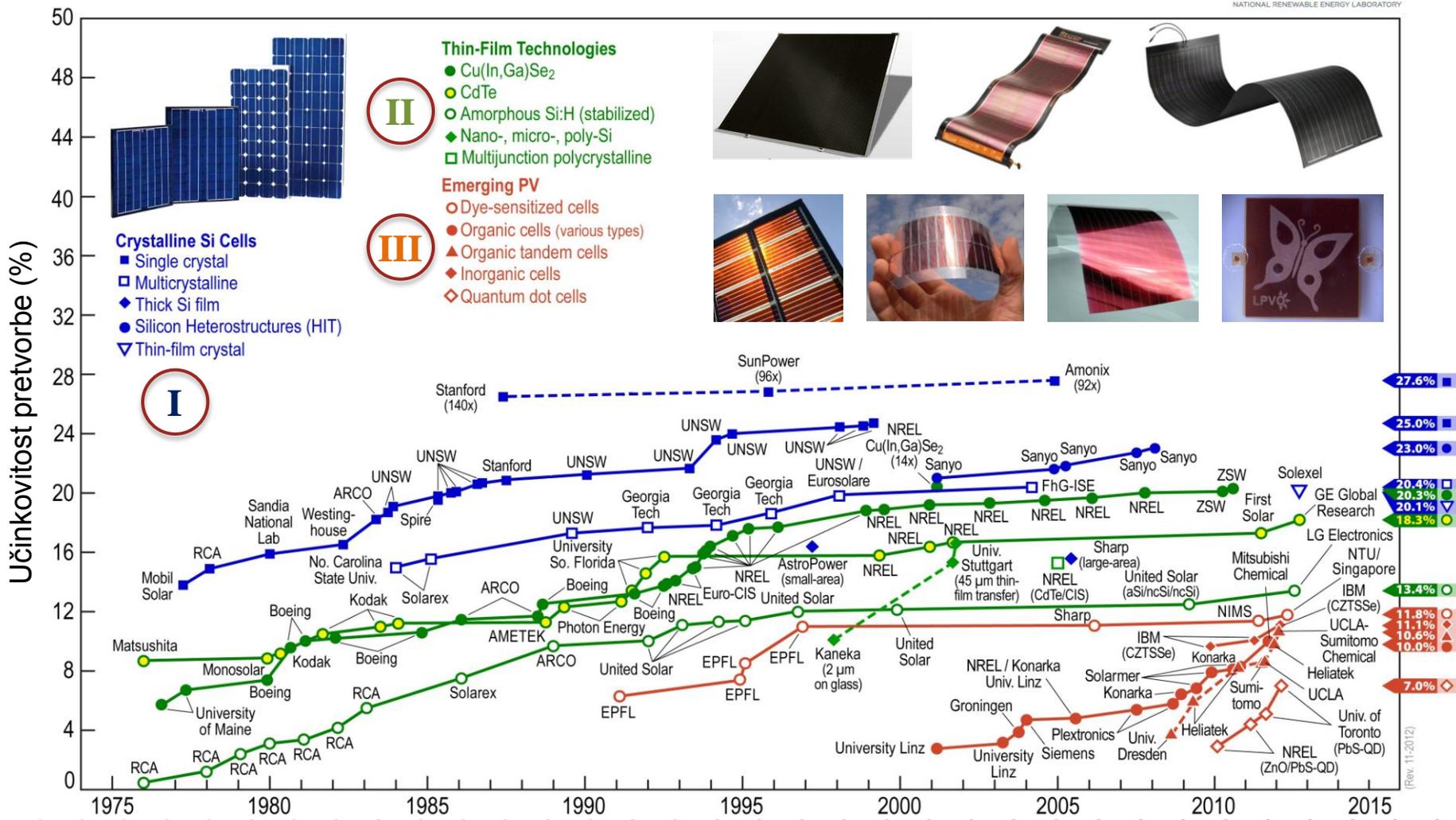
Razvoj sončnih celic



Razvoj sončnih celic

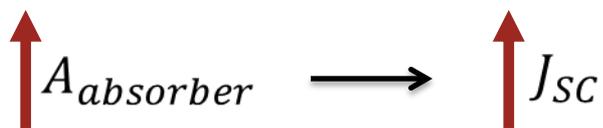


Razvoj sončnih celic

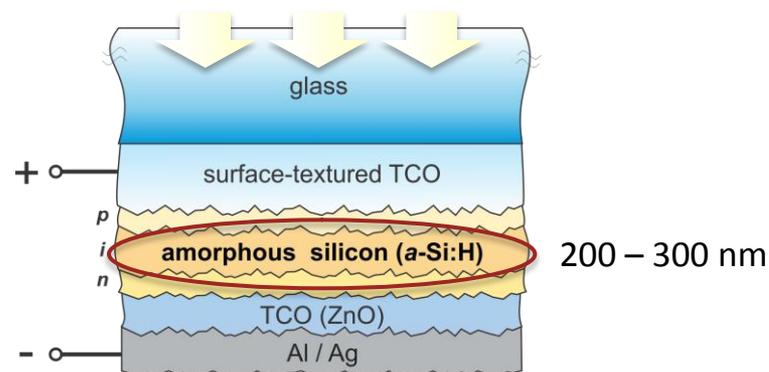


Nanoteksture v tankoplastnih celicah

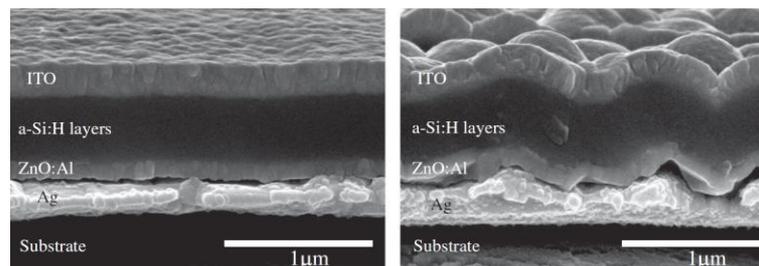
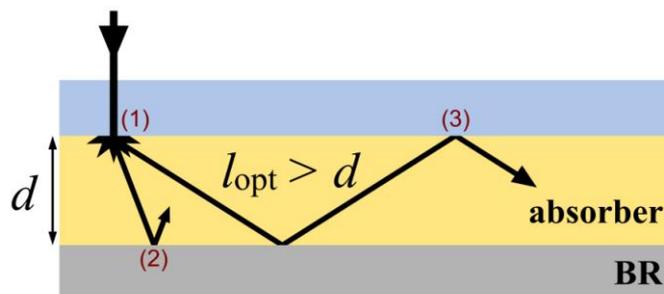
- Cilj:** Učinkovito ujetje svetlobe v tankih aktivnih plasteh



$$E_{ff} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{AM1.5}}$$



- Rešitev:** Sipanje svetlobe na teksturiranih spojih med plastmi



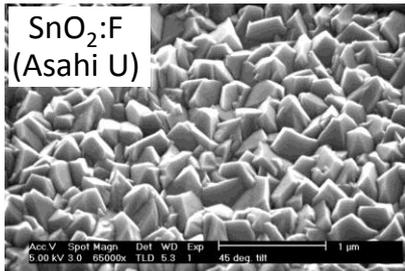
[Cho et al., SOLMAT, Vol. 95, 2011]

Nanoteksture v tankoplastnih celicah

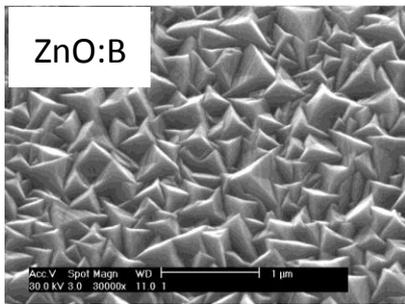
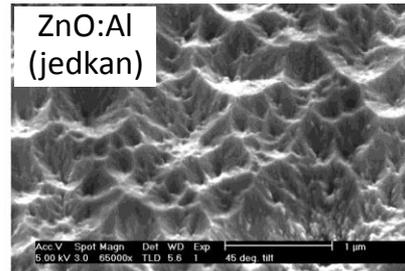
▪ Naključne

- › Naravna rast, jedkanje
- › Dobre lastnosti sipanja

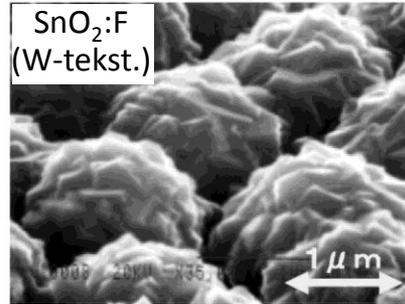
[Sato, Asahi G., 1992]



[Kluth, TSF 351, 1999]



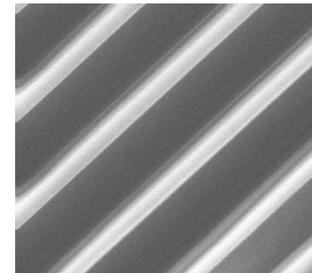
[Faj, TSF 515, 2007]



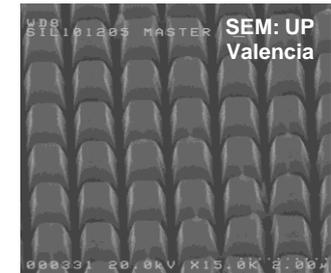
[Kambe, 3rd WC-PEC, 2003]

▪ Periodične

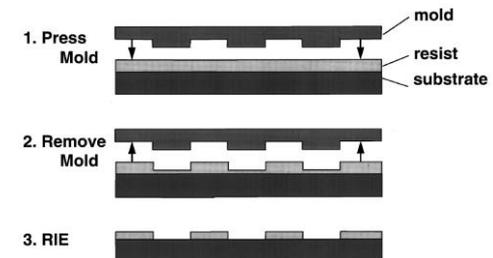
- › Primerne za „roll-to-roll“ proizvodnjo
- › Možnost napredne optimizacije



1D tekstura



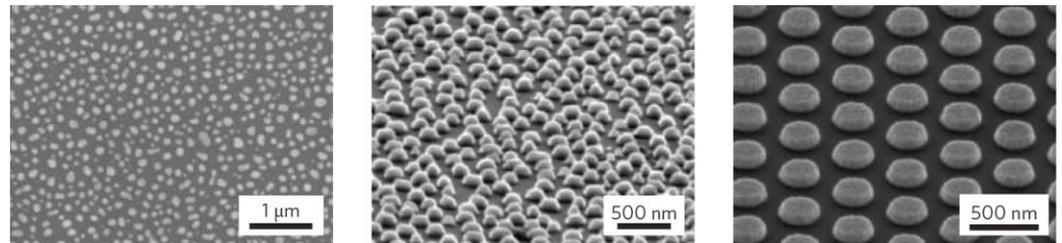
2D tekstura



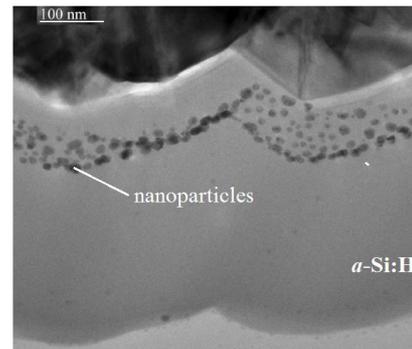
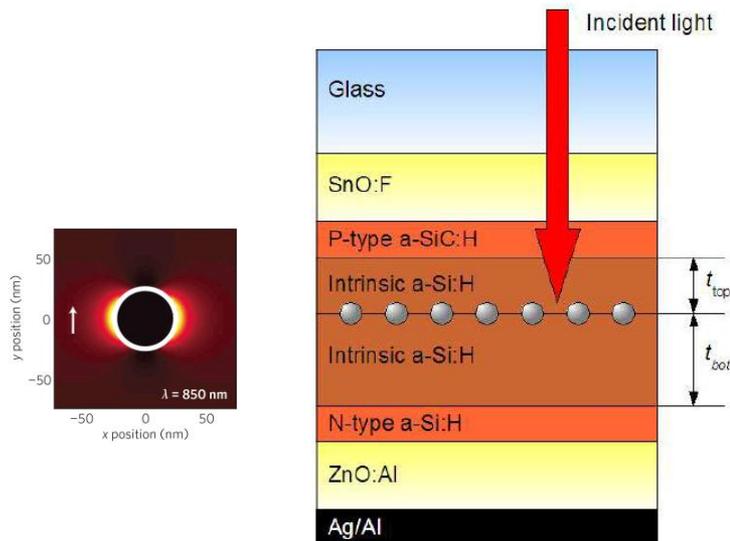
Tehnika nanovtisnjevanja

Kovinski nanodelci (plazmoni)

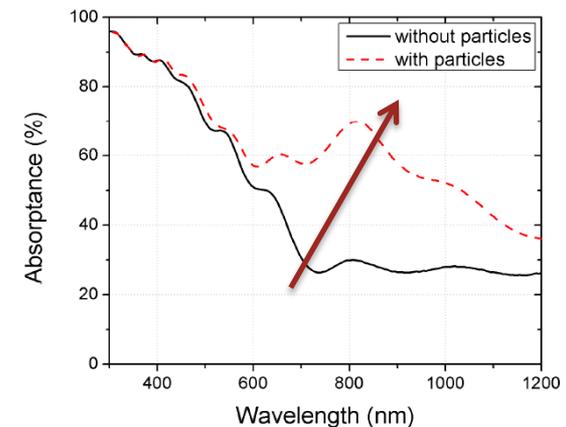
- Ključne lastnosti:
 - › Ag in Au nanodelci
 - › Učinkovito sipanje svetlobe
 - › Plazmonska resonanca
 - › Parazitna absorpcija



[Atwater, Nature Materials 9, 2010]



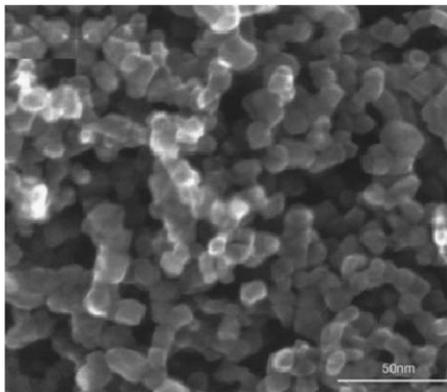
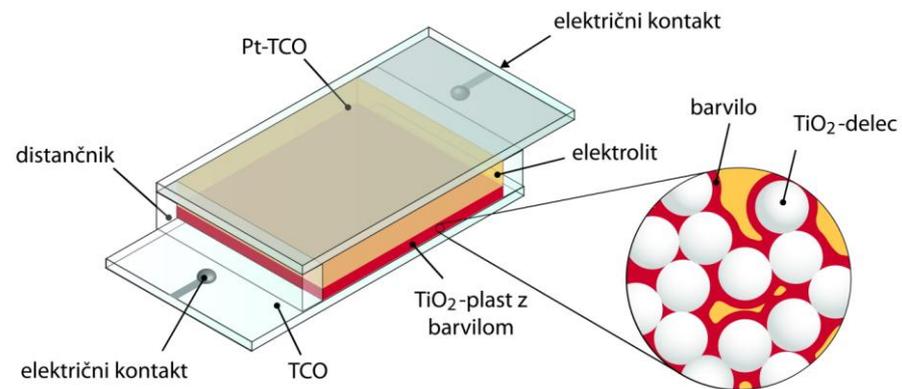
[Santbergen, MRS, 2010]



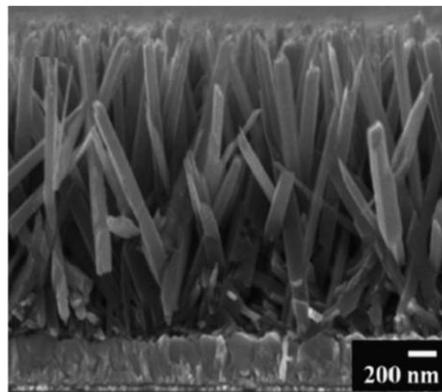
Elektrokemijske sončne celice (DSSC)

■ Zahteve za TiO_2 plast v DSSC:

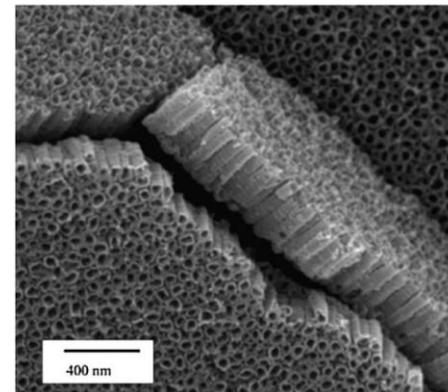
- › Dobra povezava med TiO_2 delci
- › Velika notranja površina TiO_2 plasti
- › Nizkotemperaturna izdelava



TiO_2 nanodelci



TiO_2 nanožice



TiO_2 nanocevke

[Zhang, Nano Today, 2011]

Hvala za pozornost!