

# PROJEKTOVANJE SISTEMA NA ČIPU

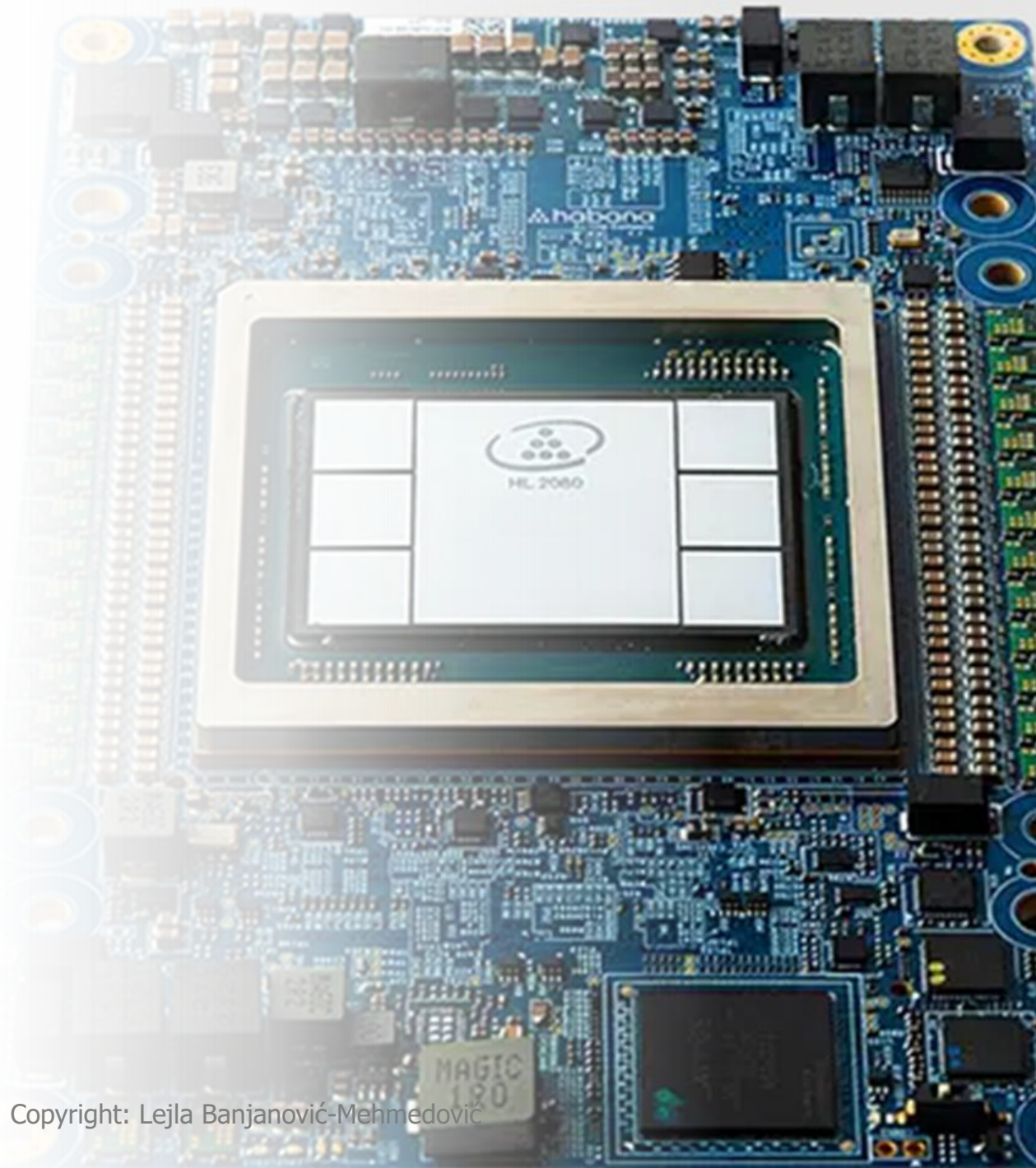
Trend ka sistemima  
na čipu (SoC)

prof. Dr. Lejla Banjanović-Mehmedović



# Sadržaj izlaganja:

- Ugradbeni sistemi
  - Mikrokontroleri
  - Digitalni Signal Procesori (DSP)
  - Programabilna digitalna kola (CPLD, FPGA)
  - SoC



# Izazov se zove ugradbeni sistemi....

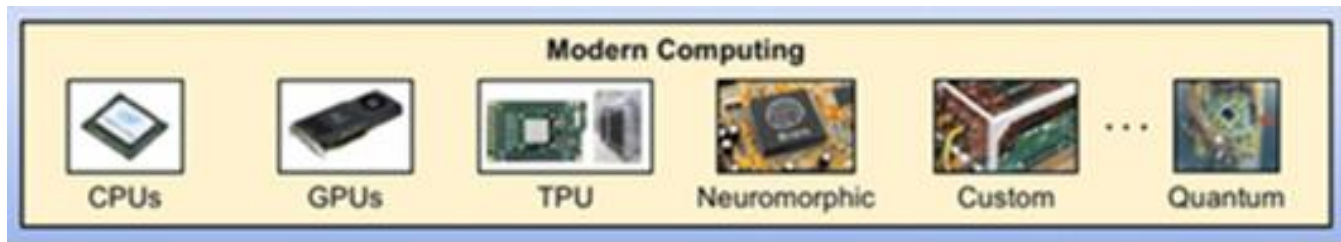
- Tehnološka revolucija 20. i 21. vijeka :
  - u domenu ugradbenih (eng. embedded) sistema
  - u domenu cyber-fizičkih sistema (Internet-of Things (IoT))
  - Vještačke inteligencije
  - Edge AI
- **Ugradbeni sistemi** - aplikacije pojedinačne funkcionalnosti
- **Cyber-fizički sistemi** - umreženi ugradbeni sistemi (automation building, inteligentni transport, Industry 4.0,...)
- **Edge AI** – implementacija vještačke inteligencije na rubnim uređajima

# Savremeni primjeri ugradbenih aplikacija



# Ugradbeni sistemi

- Tehnologija ugradbenih sistema je najbrži razvojni sektor u IT danas!
- 90% svih kompjuterskih uređaja je u ugradbenim sistemima a ne u desktop sistemima!
- Aplikacione specifične izvedbe (ASIC): FPGA, SoC,...
- GPU, TPU, NPU, VPU, neuromorfni i kvantum ugradbeni sistemi,...





# Ugradbeni sistemi

- *Ugradbeni* sistemi su
  - računarsko bazirani sistemi ugrađeni u okviru drugog sistema, za koga **obezbeđuju bolju funkcionalnost i performanse.**
  - **jako izražena integracija hardvera i softvera**, prije svega namjenjeni da obavljaju specifične funkcije, **često u realnom vremenu.**

# Ugradbeni procesori

- Procesore koji se koriste kod ugradbenih sistema često nazivamo **ugradbeni procesori**.
- Izbor pogodnog procesora koji se integriše u ugradbeni sistem uglavnom zavisi od **domena aplikacije tog sistema**.
- Neke od aplikacija su **aritmetičko intenzivne**, druge su **upravljačko intenzivne**, treće su kritične **za masovnu primjenu** sa tačke gledišta cijene ili potrošnje energije, itd.
- Da bi se ostvario efikasan proizvod (dizajn), u zavisnosti od tipa aplikacije, neophodno je koristiti različite klase ugradbenih procesora, čije se arhitekture međusobno razlikuju.

# Ugradbeni procesori

- Mikroprocesori
- Mikrokontroleri
- RISC procesori
- Digitalni Signal Procesori (DSP)
- Multimedija procesori
- ASIC
- Programabilna digitalna kola (CPLD, FPGA)
- Sistemi na čipu (SoC)



# Usporedba karakteristika ugradbenih sistema

- **Mikroprocesor:**

- Multifunkcionalo digitalno integrisano kolo
- Sadrži samo CPU
- Eksterno spajanje sa ostalom periferijom
- Zadaci nisu predefinisani – razvoj softvera, igara, web stranica, kreiranje dokumenata...

- **Mikrokontroler:**

- Sadrži CPU, RAM, ROM i ostale periferale na jednom čipu
- Poznati tipovi: ATMEL, Philips, Motorola
- Dizajnirani da izvrše specifične zadatke (gdje je relacija između ulaza i izlaza definisana)
- Mikrovalna, automobili, daljinski upravljači, kamere-aplikaciono specifični uređaji (ugradbeni sistem)

- **Sistemi na čipu:**

- Integracija gotovo svih komponenti računara na jednom čipu.
- CPU, memorija, ulazi i izlazi kao i druga periferija na jednom čipu
- NVIDIA, Intel Agilex,...
- Ugradbeni sistemi, rubno računarstvo, rubno računarstvo zasnovano na AI

- **FPGA:**

- F l e k s i b i l n o s t – m o g u ć n o s t reprogramiranja funkcionalnosti na hardverskom nivou
  - Izvršavanje bilo kojeg logičkog zadatka u skladu sa raspoloživim resursima
- HDL (Hardware Description Language) VHDL ili Verilog kao programski jezici
- Paralelizam pri izvršavanju operacija

# Mikrokontroleri

- Mikrokontroleri su relativno spori ali sa aspekta iskorištenja silicijuma po površini veoma efikasni procesori, uglavnom namjenjeni za **upravljačko-intenzivne aplikacije**.
- Karakteriše ih mikroprogramska (**eng. Complex Instruction Set Computers**) **CISC bazirana arhitektura**, što znači da je broj taktnih intervala za izvršenje različitih tipova instrukcija u velikoj mjeri promjenljiv.
- S obzirom da su mikrokontroleri namjenjeni za upravljačko orijentisani aplikacioni domen, posjeduju
  - bogat skup instrukcija za manipulisanje podacima na nivou bita,
  - periferijske komponente (tajmeri ili serijski U/I portovi).

# RISC procesori

- **RISC (eng. Reduced Instruction Set Computing)** procesori su evoluirali od CISC arhitektura kao rezultat zapažanja da se **kompleksne instrukcije kod praktičnih aplikacija izvršavaju veoma rijetko.**
- Nasuprot CISC procesorima, RISC procesori **posjeduju veoma mali (ograničeni) skup instrukcija, koje se mogu izvršavati velikom brzinom.** S obzirom da su sve instrukcije RISC-a istog obima i da za izvršenje zahtjevaju isti broj taktnih intervala, izvršenje instrukcija se može učiniti protočnim čime se postiže veća propusnost u odnosu na mehanizam karakterističan za čisto sekvencijalno izvršenje.

# Primjene mikrokontrolera

- Mikrokontroleri su uglavnom dizajnirani za specifične zadaće
  - od jednostavne regulacije osvjetljenja, alarmnih sistema ...
  - u kontroli dijela proizvodnog procesa ili gotovo cijelog proizvodnog procesa.
  - upravljanja robotima u industrijskim pogonima.
- Koriste **mali iznos energije**, često uključuju **sleep mode**, bitno kad se koriste embedded komponente kao senzorski mrežni čvorovi u Cyber-fizičkih sistemima.



# Digitalni Signal Procesori (DSP)

- DSP-ovi su uglavnom projektovani **za aritmetičko intenzivne signal procesne aplikacije**, te su njihovi skupovi instrukcija prilagođeni za brzo izvršenje algoritama tipa digitalno filtriranje, FFT, i dr.
- Ove operacije su podržane od strane specijalnih hardverskih komponenata, kakvi su **hardverski množači i namjenske jedinice za generisanje adresa**.
- Sa ciljem da obezbjede efikasno signal procesiranje, DSP-ovi obično podržavaju određeni stepen (eng. Integer linear programming) **ILP-a**, tj. **odredjene kombinacije instrukcija se mogu, u svakom instrukcionom ciklusu, paralelno izvršavati**, zahvaljući specijalnoj arhitekturi memorije.

# Digitalni Signal Procesori (DSP)

- Aplikacije procesiranja signala (zajedničko svojstvo):
  - rade sa ogromnim brojem uzoraka
  - tipično izvršavaju intenzivne sofisticirane matematske operacije nad podacima (sistemska identifikaciju, frekventnu analizu, mašinsko učenje, ekstrakciju karakteristika)

# DSP procesori

- Aplikacije: radari, sonari, video analitika, sistem podrške vozaču, ...
- **Aplikacije kontrole kretanja** – očitavanje pozicije ili lokacije iz senzora - sample rate od nekoliko Hz (uzoraka/sekundi) do nekoliko stotina Hz.
- DSP-ovi takođe **imaju znatno manju potrošnju energije** čime su prikladniji za upotrebu u mobilnim uređajima.

# DSP procesori

- Najpoznatiji proizvođač DSP-ova su:
  - (Texas Instruments) TI, koja nudi širok spektar DSP-ova za različite domene aplikacija, kakvi su audio ili video signal procesiranje; Motorola, Analog Devices, NEC.

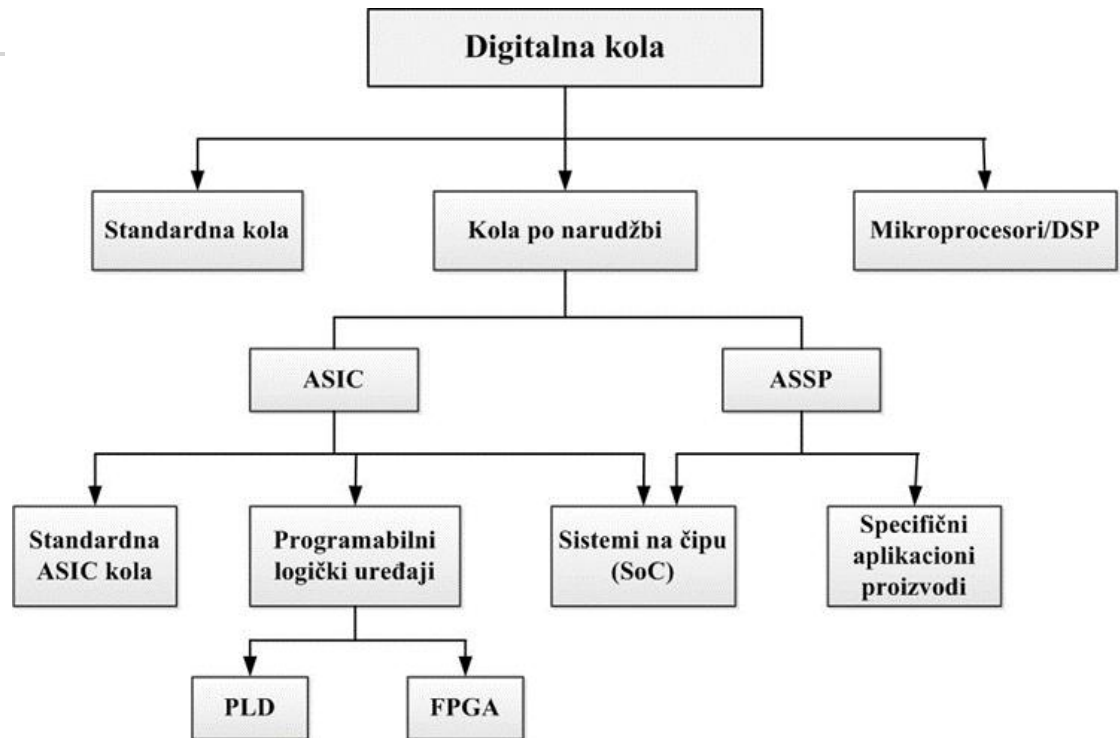


# Aplikaciono-specifični integrisani krugovi (ASIC)

- Ova kola su projektovana tako da **odgovaraju specifičnoj namjeni.**
- Za razliku od standardnih komponenata, **funkciju ASIC kola definiše korisnik.**
- ASIC kola se proizvode **po narudžbi** u velikim ili malim serijama što utiče na njihovu cijenu.

# Podjela digitalnih kola po funkcionalnosti

- Aplikaciono-orjentisana integrisana kola (ASIC)
- **Programabilni logički uređaji (CPLD, FPGA)**



# Usporedba mikrokontroleri i rekonfigurabilni digitalni sistemi

- Osnovna razlika između mikrokontrolerski/DSP sistema i ostalih digitalnih sistema je u tome što su računarski sistemi obično praćeni programiranom sekvencom instrukcija koje dizajner specificira.
- Međutim, mnoge aplikacije zahtijevaju brži odgovor nego što mikrokompjuterska/DSP arhitektura može da obezbijedi i u takvim slučajevima neophodno je koristiti konvencionalna digitalna kola, osobito programabilna.

# Savremni pravac razvoja digitalnih sistema

- S obzirom na veoma brz razvoj današnje tehnologije, **većina konvencionalnih digitalnih sistema se ne implementira standardnim logičkim uređajima koji sadrže samo jednostavna kola ili funkcije.**
- Širok opseg funkcija, nisu definisane pri fabrikaciji, **već programiranjem**, omogućavaju širok izbor karakteristika, brzine i logičkog kapaciteta) i brzog projektovanja (razlika vrijeme dizajna mjeseci: par dana ili sedmica)



# Programabilna logička kola

- Programabilni logički uređaji (terminologija):
  - PLD (Programmable Logic Device)
  - User Programmable Logical Devices (UPLD)
  - Rekonfigurabilno računarstvo (eng. reconfigurable computing - RC)

# Rekonfigurabilno računarstvo

- Rekonfigurabilno računarstvo kao naučna disciplina pokriva širok dijapazon oblasti istraživanja i rada **od računarske tehnike (tj računarskog inženjerstva) pa sve do elektronike.**
- Osnovna ideja koja se odnosi na princip rada rekonfigurabilnih kola se sastoji u tome da se kola mogu nakon fabrikacije, neograničeni broj puta re-programirati.
- Na ovaj način, jedno te isto kolo se može koristiti za izvršenje različitih algoritama (tj. aplikacija).

# Programabilna logička kola

- Strukturu PLD kola čini fiksni skup komponenti kakvi su **logički gejtovi ili složeniji logički blokovi (LEs – Logics Elements ili LCs – Logic Cells)**, međusobno spojeni programabilnim vezama.
- Programiranjem ovih veza krajnji korisnik definiše funkciju kola, čime je on u potpunosti nezavisan od proizvođača.  
**Jednom programirana funkcija se može mijenjati djelimično ili u potpunosti.**
- Prema složenosti i organizaciji unutrašnje strukture savremena PLD kola se mogu klasifikovati u sljedeće kategorije:
  - SPLD
  - HPLD

# Programabilna kola

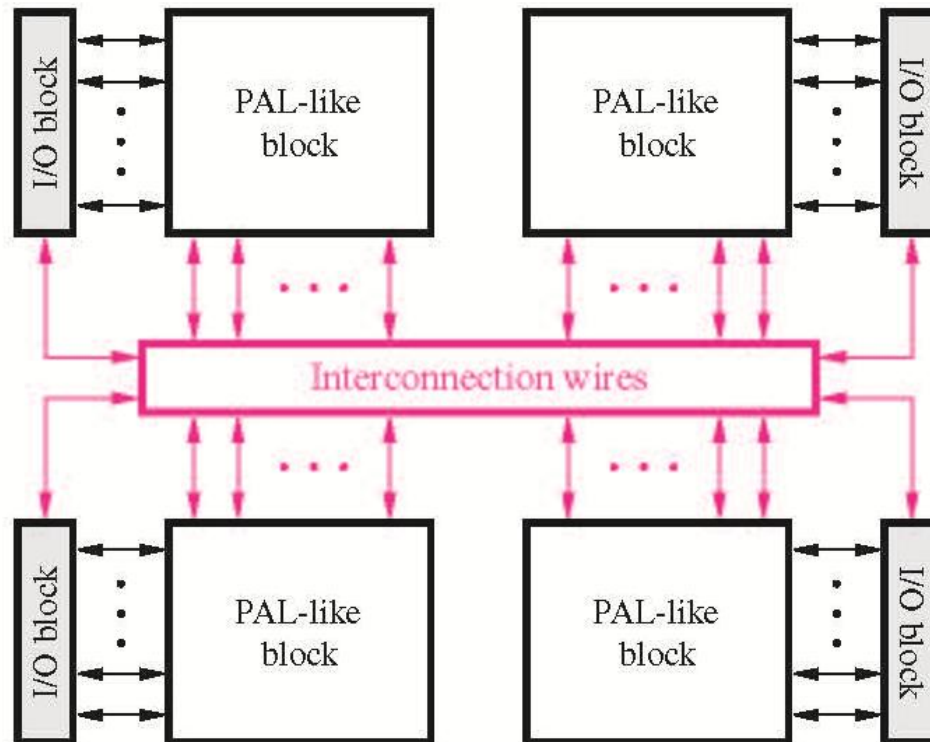
## – HPLD:

- **CPLD (Complex PLD).** Sastoje se od većeg broja programabilnih logičkih blokova povezanih preko centralizovane programabilne sprežne mreže.
- **FPGA (Field Programmable Gate Array).** PLD kola visokog stepena integracije koje se izvode kao polje velikog broja programabilnih logičkih blokova (ćelija) jednostavne strukture raspoređenih na infrastrukturi koja ih međusobno povezuje.



# CPLD logička kola

- Sastoje se od više SPLD logičkih kola koja su uzajamno povezana programabilnim vezama u jednom čipu.



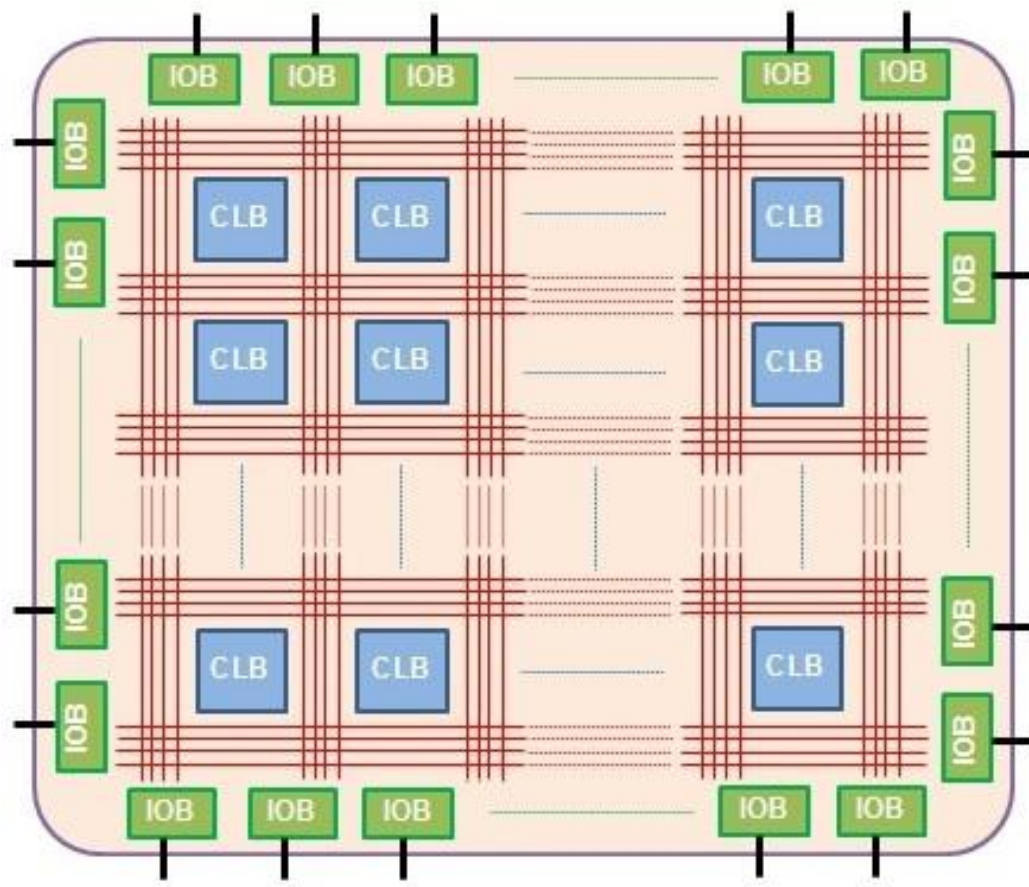
## **PAL komponente:**

- programabilno polje AND gejtova i
- neprogramabilno polje OR gejtova

# FPGA kola (Field Programmable Gate Array)

- **FPGA** (eng. Field-Programmable-Gate-Array Univerzalni programabilni logički sklop) predstavlja integrisano kolo projektovano na taj način tako da **krajnji korisnik može konfigurisati njegovu unutrašnju strukturu.**
- **Definisanje unutrašnje strukture PLD kola se vrši uz pomoć HDL (engl. Hardware Description Language) jezika ili šematskih dijagrama.**

# Opšta struktura FPGA

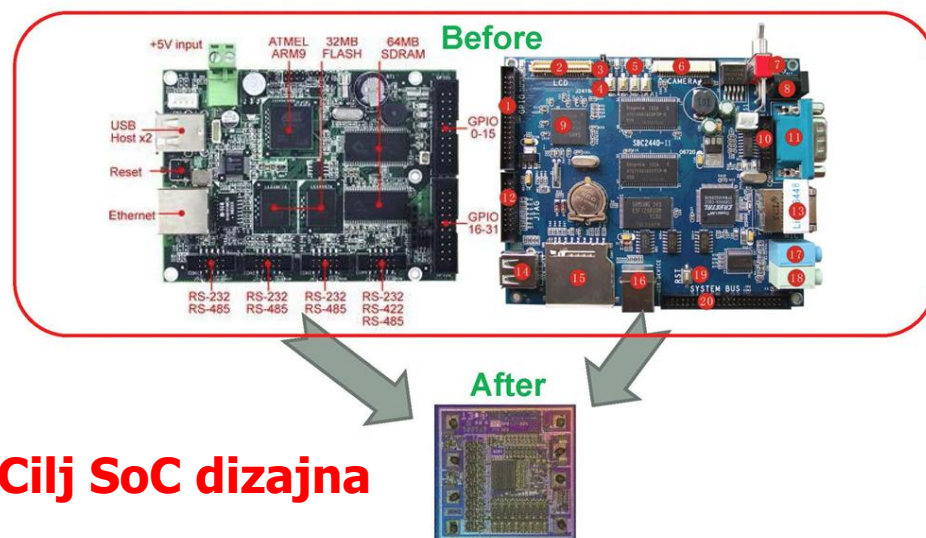


## Osnovni elementi FPGA kola

- **Logičke ćelije** (tzv. Configurable Logic Block, **CLB**, ili Logic Array Block, **LAB**, zavisno od proizvođača)
- **U/I ćelije**
- **Kanali usmjeravanja**

# Sistem na čipu (SoC)

- Ugradbeni sistemi također su bazirani danas na SoC-ovima.
- Pristup sistemu na čipu je u suprotnosti s tradicionalnim računarom s CPU čipom i zasebnim upravljačkim čipovima, GPU-om i RAM-om koji se po potrebi mogu zamijeniti, nadograditi ili zamijeniti.



# Osnovne komponente sistema na čipu (SoC)

- Put prema pametnim telefonima i tabletima usmjerio integraciju dalje od mikroprocesora ili mikrokontrolera.
- Rezultat je **sistem na čipu (SoC)** koji može upakirati u jedan paket:
  - CPU-u i sistemsku memoriju i
  - mnoge elemente modernog računarskog sistema (GPU, ćelijski modem, AI akceleratori, USB kontroler, mrežno okruženje)
- **Korištenje SoC-ova čini računare manjim, bržim, jeftinijim i sa malom potrošnjom energije.**

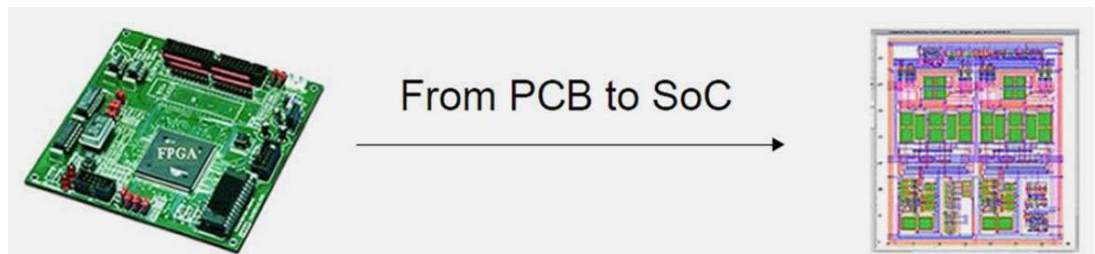
# SOC

## Tehnološke prednosti

- Današnji čipovi sadrže **100Mtranzistora**
- Dimenzije tranzistorskog gata u **nanometrima**
- Aproksimativno svakih 18 mjeseci **broj tranzistora na čipu se duplicira**

## Konsekvence

- Komponente printane ploče (Printed circuit board (PCB) **sada smještene na samo jedan čip**
- Razvoj dizajna **System-on-chip**



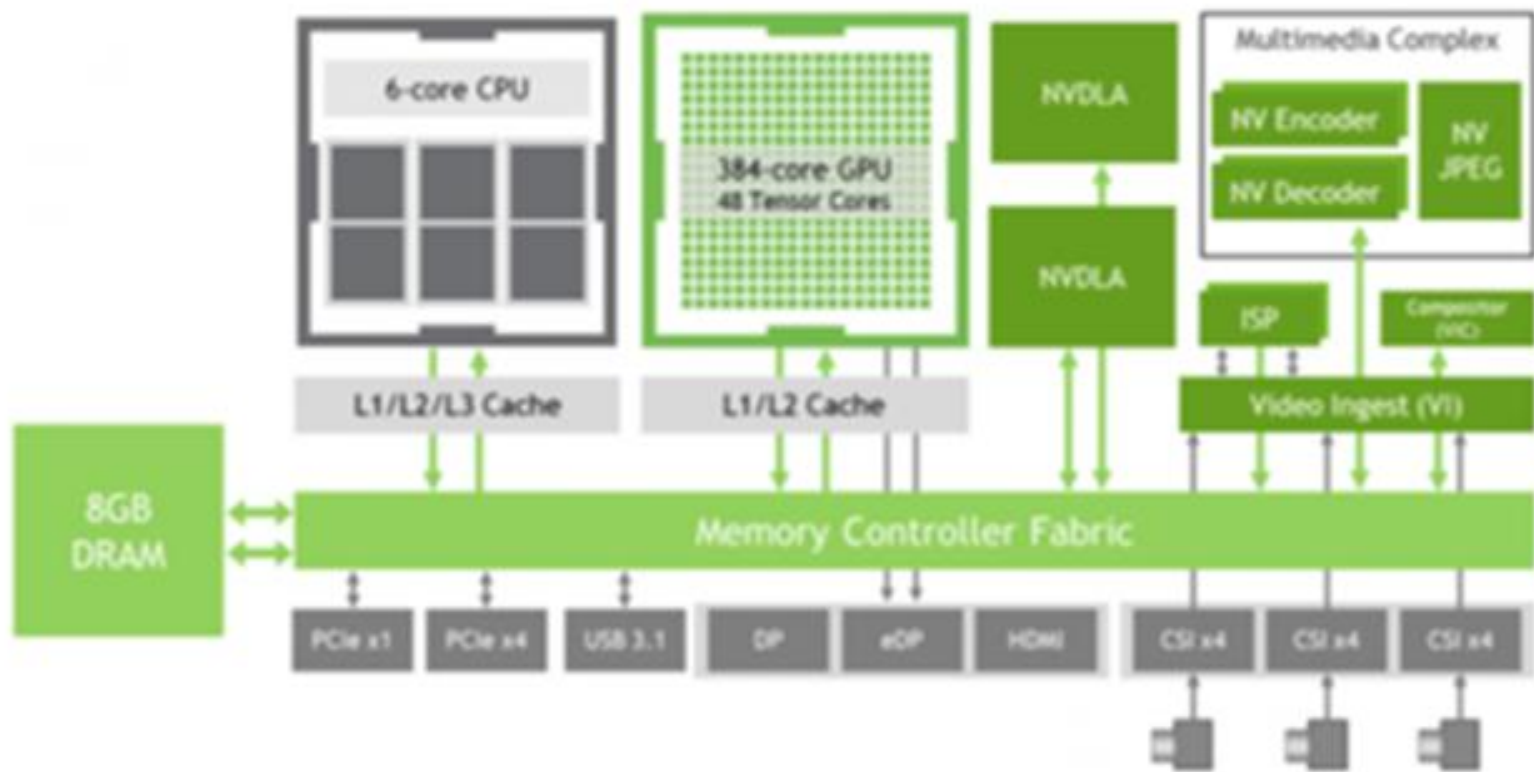
# SoC u personalnim računarima

- Sve do nedavno, SoC-ovi su se rijetko pojavljivali u personalnim računarima.
  - **2020.** - Apple je predstavio M1, svoj prvi SoC za personalna i prenosna Mac računare. M1 kombinuje CPU, GPU, memoriju itd. na jednom komadu silicija.
  - **2021.** - Apple je poboljšao M1 s M1 Pro i M1 Max, kreirane izvrsne izvedbe.



# SoC kao ugradbeni sistemi

- Tamo gdje su se prije mogli koristiti samo mikrokontroleri, **SoC-ovi postaju sve značajniji na tržištu ugradbenih sistema.**
- Čvršća integracija sistema nudi bolju pouzdanost. **SoC-ovi nude napredniju funkcionalnost i računarsku snagu od mikrokontrolera.**
- **Aplikacije uključuju AI ubrzanje, prikupljanje podataka, telemetriju i ambijentalnu inteligenciju.**
- **Često ugradbeni sistemi na čipu ciljaju internet stvari (IoT), industrijski internet stvari i najbrža tržišta računarstva.**
- **Najnovije Edge AI!**

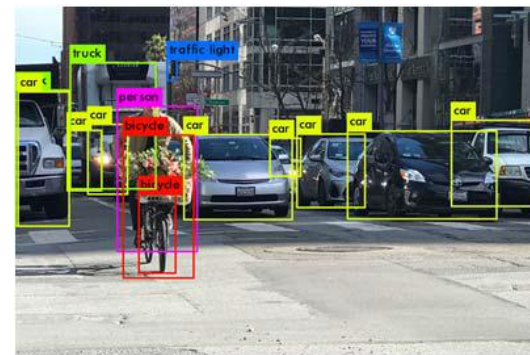


## Autonomna vozila –primjer primjene SoC

- **NVIDIA DRIVE PX**
  - <https://www.nvidia.com/en-us/self-driving-cars>
  - ARM+GPU (Tegra) based solution
  - Used by Tesla
- **MobilEye (an Intel company)**
  - <http://mobileye.com>
  - Custom ASIC/SoC solution

# Tržišni fokus SoC

- **Vizuelno prepoznavanje objekata**
  - za dronove,
  - za autonomna vozila (servisni mobilni roboti)
  - automatizaciju pametnih kuća ...
  - asistivni sistem vozača (automotive driver assistance systems (ADAS))
- **Koji problem trebamo riješiti ?** Algoritimi za:
  - izbjegavanje prepreka (Collision avoidance)
  - praćenje linije (Lane tracking/keeping)
  - prepoznavanje znakova (Traffic sign recognition)
  - vještačka inteligencija (neuronske mreže, duboke neuronske mreže, RL)



# Savremeni primjeri primjene FPGA, SoC - rubno računarstvo i Edge AI

