

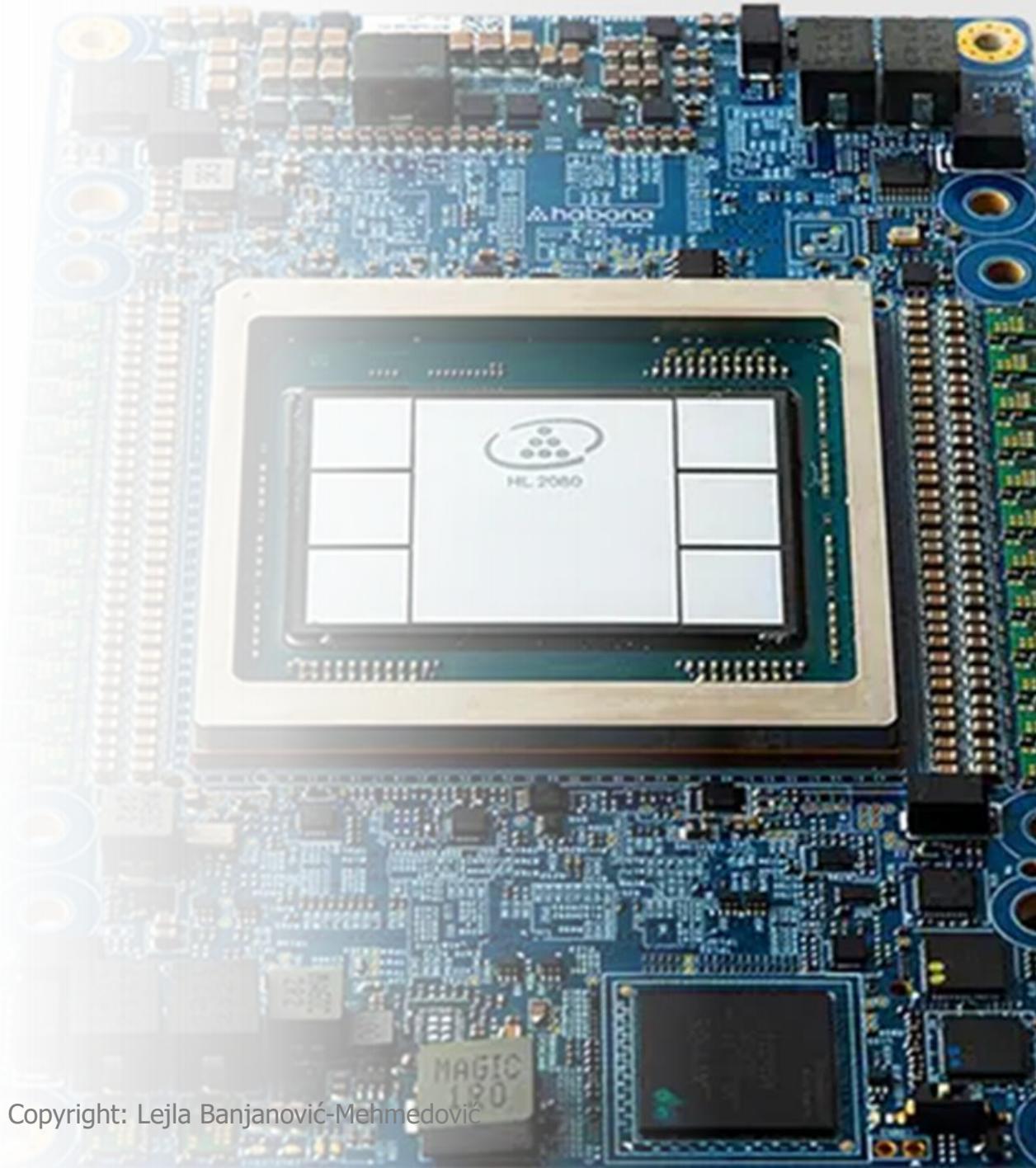
PROJEKTOVANJE SISTEMA NA ČIPU

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

Savremni primjeri ugradbenih aplikacija

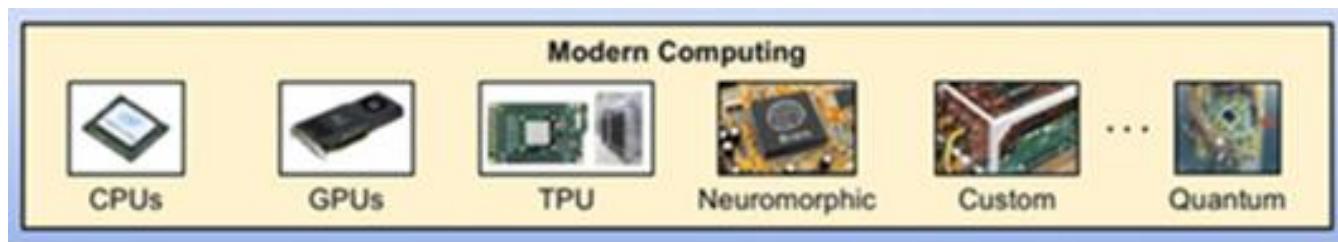


Projektovanje sistema na
čipu 1

Copyright: Lejla Banjanović-
Mehmedović

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 **obezbedjuju 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:**
 - Fleksibilnost – mogućnost 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 množaci 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 огромним бројем узорака
 - типично извршавају интензивне sofisticirane математске операције над подацима (системску идентификацију, фреквентну анализу, машино учење, екстракцију карактеристика)

DSP procesori

- Aplikacije: radari, sonari, video analitika, sistem podrške vozaču, ...
- **Aplikacije kontrole kretanja** – očitanje 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

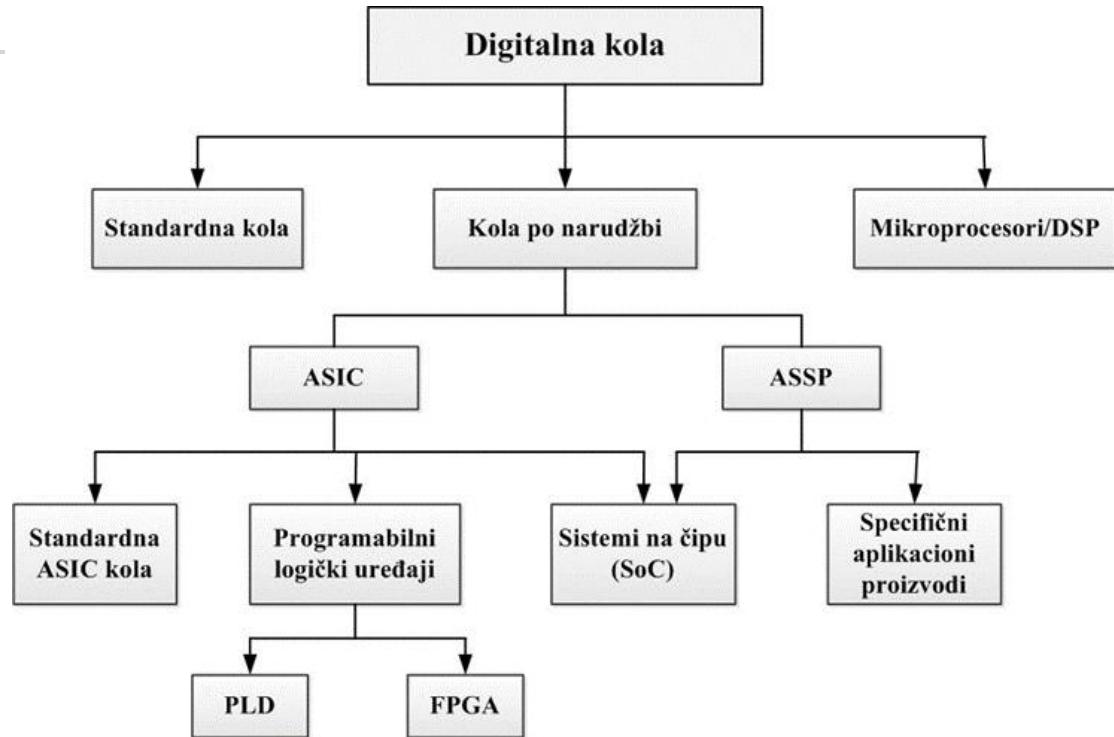
- Najpoznatiji proizvodjač DSP-ova su:
 - (Texas Instruments) TI, koja nudi širok spektar DSP-ova za različite domene aplikacija, kakvi su audio ili video signal procesiranje; Motorola, Analog Devices, NEC.

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-orientisana 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

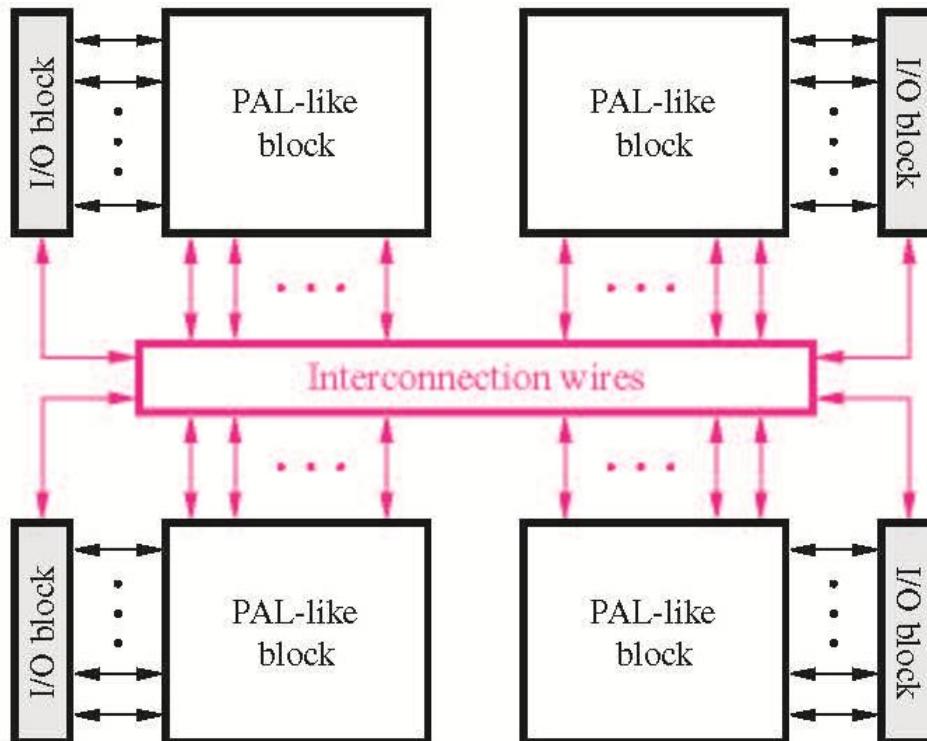
Programabilna kola

– 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.



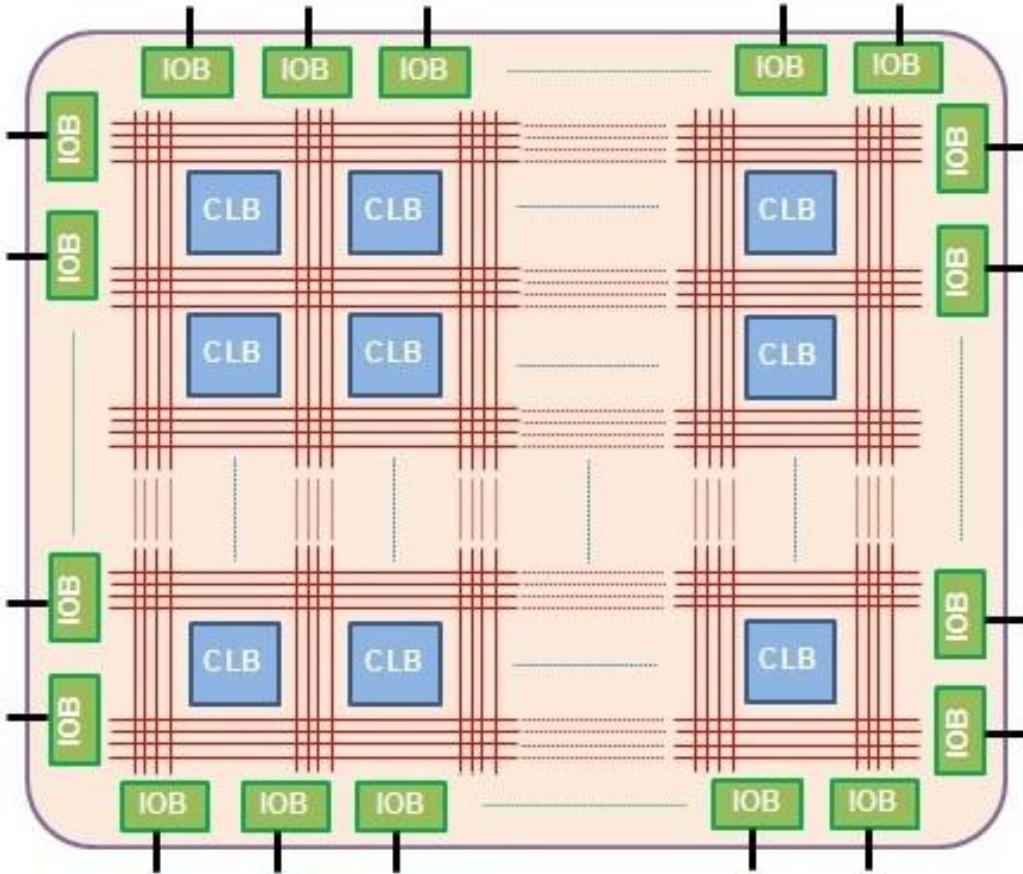
PAL komponente:

- 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

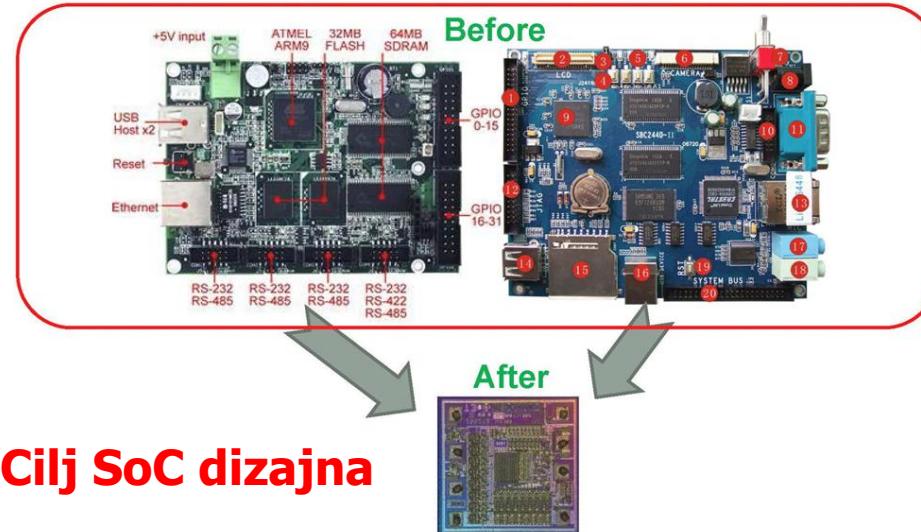


Osnovni elementi FPGA kola

- **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, čelijski modem, AI akceleratore, USB kontroler, mrežno okruženje)
- **Korištenje SoC-ova čini računare manjim, bržim, jeftinijim i sa malom potrošnjom energije.**

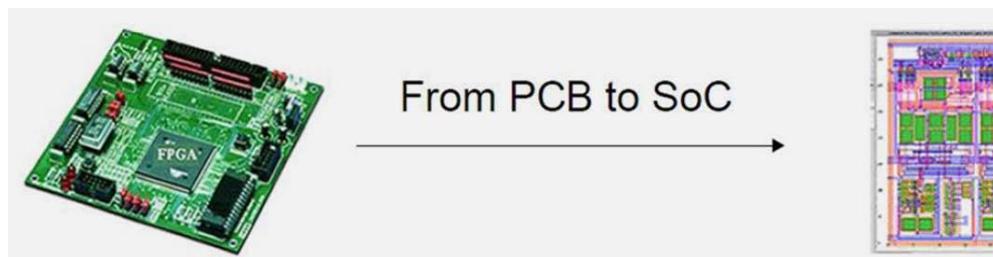
SOC

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**

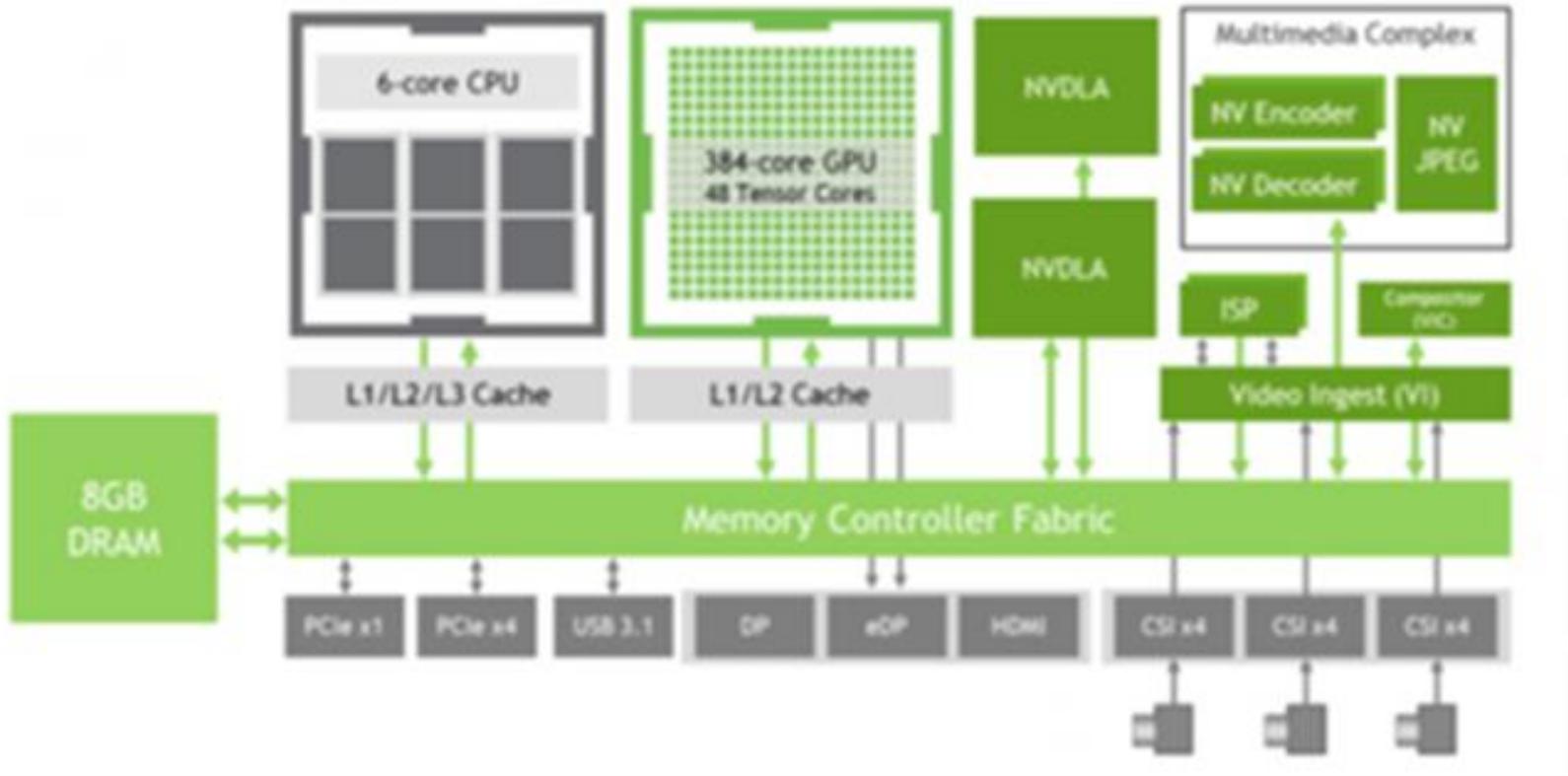


SoC u personalnim računarima

- 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!**

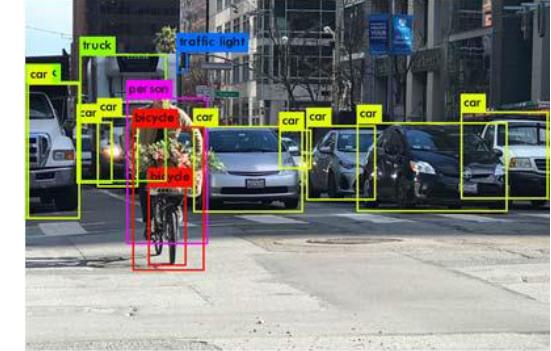


Autonomna vozila –primjer primjene SoC

- **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 ...
 - assistivni sistem vozača (automotive driver assistance systems (ADAS))
- **Koji problem trebamo rješiti ? Algoritimi za:**
 - izbjegavanje prepreka (Collision avoidance)
 - praćenje linije (Lane tracking/keeping)
 - prepoznavanje znakova (Traffic sign recognition)
 - vještačka inteligencija (neuronske mreže, duboke neuronske mreže, RL)



Savremni primjeri primjene FPGA, SoC - rubno računarstvo i Edge AI

