

# **Evolucioni period arhitekture računara oko 1990. (nastavak)**

# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- Povećanje brzine izvršavanja
  - uloga kompajlera
- Samo neophodne naredbe – load/store arhitektura
  - prenos podataka
  - celobrojna/realna aritmetika
  - logičke
  - upravljačke
- Realizacija zauzima mnogo manje prostora od CISC
  - skraćivanje procesorskog ciklusa
  - povećanje broja registara opšte namene
    - 32 i više
    - *register window* – skup registara za podršku rada pojedinačnih potprograma
  - povećanje paralelizma u radu procesora
  - ugradnja skrivene memorije u procesor
  - prebacivanje upravljanja virtuelnom memorijom u nadležnost procesora

# Arhitektura računara IV generacije

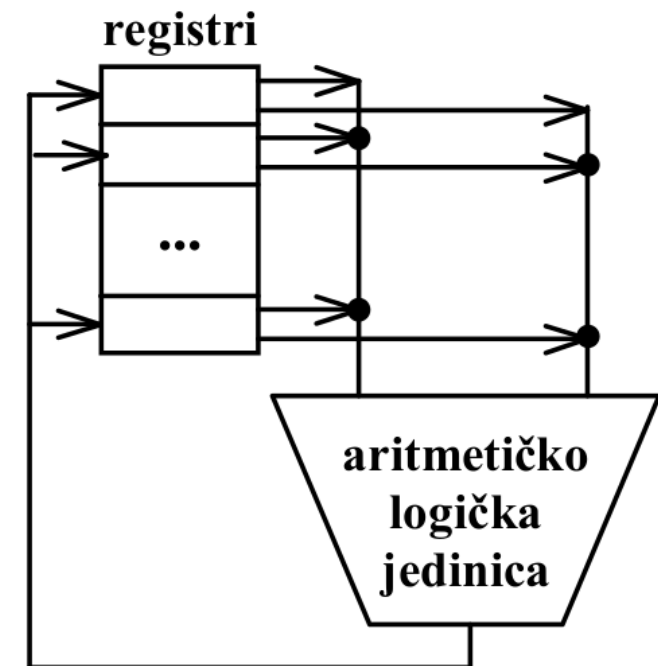
## RISC procesori

- Realizacija zauzima mnogo manje prostora od CISC
  - Proširenje adresnog prostora
  - 64-bitne arhitekture:
    - 1974. – CDC Star-100
    - 1976. – Cray-1
    - 1991. – MIPS R4000
    - 1992. – DEC ALPHA
    - 1997. – IBM RS64 PowerPC
    - 2001. – Intel Itanium IA-64
    - 2003. – AMD Opteron, Athlon 64
    - 2006. – Sony, IBM i Toshiba Cell
    - 2011. – ARM ARMv8-A

# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- Povećanje paralelizma
  - Više sabirnica (engl. *three-bus architecture*)
    - u jednom ciklusu
      - dva registra do AL jedinice
      - rezultat u registar
  - Stepen za dobavljanje protočne strukture uvećava PC
  - Više nezavisnih stepeni za izvršavanje aritmetike
  - Super-skalari – izvršavaju višenaredbi odjednom
    - IBM RS/6000
    - DEC ALPHA
    - precizni i neprecizni prekidi



# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- Skrivena memorija
  - Data/instruction cache
  - Dva nivoa:
    - viši nivo - manja i brža (blizu brzine registara)
    - niži nivo - veća i sporija
  - DEC ALPHA 21164
    - 2 x 8K (data/instruction)
    - 96k
- Prebacivanje MMU u procesor
  - brže pretvaranje adresa

# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- Uloga kompajlera
  - Direktno odgovoran za ubrzanje rada
  - Što dugotrajnije preklapanje
    - razdvajanje međusobno zavisnih naredbi
    - statičko raspoređivanje
  - Nepostojanje status registra
    - veća sloboda kompajlera
    - upotreba registara opšte namene
    - spajanje provere uslova i skoka
  - **Odmotavanje petlje** (engl. *loop unrolling*)
  - Najčešće korišćene vrednosti

# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- Uslovne upravljačke naredbe
  - Moguće pražnjenje protočne strukture
  - **Dinamičko predviđanje** (engl. *dynamic branch prediction*)
    - loše predviđanje – poništavanje efekata loših naredbi
      - privremene lokacije za rezultate
      - privremene lokacije za originalne vrednosti
  - pamćenje ishoda prethodnih izvršavanja
  - kompajler može da označi sigurne ishode

# Arhitektura računara IV generacije

## Dinamičko predviđanje

```
int rand_partsum(int n){  
    int i,k;  
    long sum = 0;  
    int *vec = malloc(n*sizeof(int));  
  
    for (i = 0; i < n; i++)  
        vec[i] = rand()%n;  
  
    //qsort(vec,n,sizeof(int),cmpfunc);  
  
    for (k = 0; k < 1000000; k++)  
        for (i = 0; i < n; i++)  
            if (vec[i] > n/2) sum += vec[i];  
    return sum;  
}
```

Intel Core i7-5500U,  
 $n = 5000 \sim 30s$



# Arhitektura računara IV generacije

## Dinamičko predviđanje

```
int rand_partsum(int n){  
    int i,k;  
    long sum = 0;  
    int *vec = malloc(n*sizeof(int));  
  
    for (i = 0; i < n; i++)  
        vec[i] = rand()%n;  
  
    qsort(vec,n,sizeof(int),cmpfunc);  
  
    for (k = 0; k < 1000000; k++)  
        for (i = 0; i < n; i++)  
            if (vec[i] > n/2) sum += vec[i];  
    return sum;  
}
```

Intel Core i7-5500U,  $n = 5000 \sim 30s$

sa sortiranjem  $\sim 13 s$   
(mnogo bolje dinamičko  
predviđanje poređenja)

# Arhitektura računara IV generacije

## RISC procesori

- **Izvršavanje naredbi van redosleda** (engl. *out of order*)
  - nakon dobavljanja zavisne naredbe se odmah prelazi na sledeću (nezavisnu)
  - evidencija korišćenja registara (*scoreboarding*)
  - ako naredbe samo koriste isti registar
  - korišćenje rezervnog registra (engl. *register renaming*, Tomasulov algoritam)
- Neophodne velike radne memorije
- Memorijski preslikani ulaz-izlaz
- IEEE 754 standard za aritmetiku realnih brojeva

# Arhitektura računara IV generacije

## IEEE 754 standard za aritmetiku realnih brojeva

- 3 formata MNF:
  - **jednostruka preciznost** od 32 bita
    - najznačajniji bit za predznak
    - narednih 8 bita za podešeni eksponent
    - preostalih 23 za frakciju
  - **dvostruka preciznost** od 64 bita
    - najznačajniji bit za predznak
    - narednih 11 bita za podešeni eksponent
    - preostalih 52 za frakciju
  - **proširena preciznost** od 80 bita (interno korišćenje)

# Arhitektura računara IV generacije

## IEEE 754 standard za aritmetiku realnih brojeva

- Denormalizovani (engl. *denormalized*) brojevi
- Za vrednosti manje od mogućnosti MNF (engl. *underflow*)
- Oznaka za beskonačno (engl. *infinity*)
- Oznaka za neodređeno (NaN, engl. *not a number*)

# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi MIPS

- Mašinski format naredbe
- Aritmetičko-logičke naredbe:

6 bita kod naredbe	5 bita ulazni reg1	5 bita ulazni reg2	5 bita izlazni reg	5 bita konstanta	6 bita kod naredbe
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------	-----------------------

- Naredbe prenosa:

6 bita kod naredbe	5 bita ulazni reg	5 bita izlazni reg	16 bita konstanta
-----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------

- Upravljačke naredbe:

6 bita kod naredbe	5 bita ulazni reg1	5 bita ulazni reg2	16 bita konstanta
-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------

- poređenje dva registra
- 0 ili 1 u registru

# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi MIPS

- Mašinski format naredbe
- Bezuslovni skokovi:

6 bita kod naredbe	10 bita konstanta
-----------------------	----------------------

- Tipovi naredbi:
  - naredbe za rukovanje podacima (za prenos podataka)
  - naredbe za rukovanje bitima (logičke naredbe i naredbe pomeranja)
  - naredbe za celobrojnu binarnu aritmetiku (obuhvaćene sve aritmetičke operacije),
  - naredbe za aritmetiku realnih brojeva (obuhvaćene sve aritmetičke operacije)
  - upravljačke naredbe
  - sistemske naredbe

# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi Intel Pentium Pro, 1995 (u odnosu na 80386)

- FPU
- Naredbe za regulaciju potrošnje energije
  - prenosni računari
- MMX
  - SIMD
- Super-skalar
  - do 3 naredbe u jednom ciklusu
  - **RISC jezgro**
    - 12-stepena protočna struktura, *out of order* izvršavanje
    - izvršava mikro-programe Pentium Pro naredbi
  - 8 kB L1 data cache, 8 kB L1 instruction cache, 96 kB L2 cache

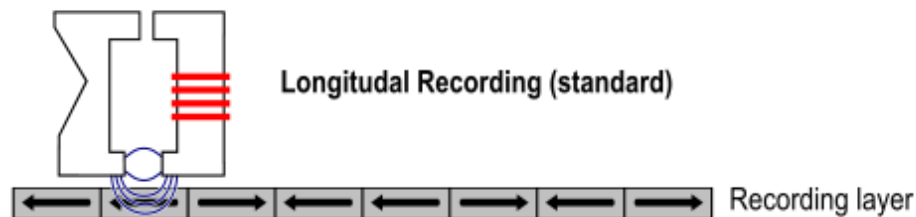
# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

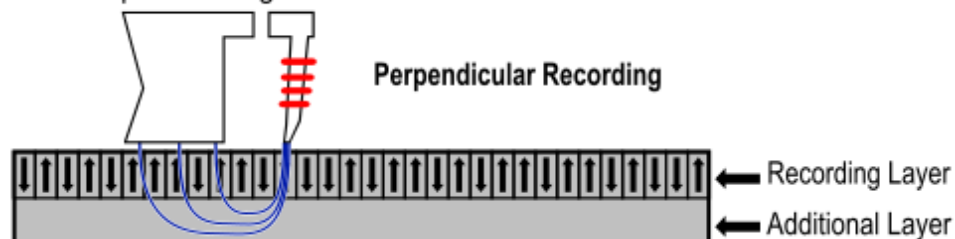
- Magnetni diskovi
- Kapacitet 60% godišnje
- Povećanje gustine, *perpendicular recording* (2005)



"Ring" writing element



"Monopole" writing element





# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

- Magnetni diskovi
  - srednje vreme pristupa 3% godišnje
    - veća gustina ➡ manje dimenzije ➡ manji pređeni put
  - povećanje broja sektora na spoljnim stazama
  - kB, MB, GB, KiB, MiB, GiB
  - korišćenje K diskova u nizu (engl. *disk array*) za veću brzinu
    - slično modularnoj memoriji
    - sukcesivne lokacije na sukcesivnim diskovima (engl. *data stripping*)
  - korišćenje više diskova za veću pouzdanost
  - **RAID** (engl. *redundant array of independent disks*)

# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

- RAID
  - RAID 0
    - *stripping*
    - manja pouzdanost
  - RAID 1
    - *mirroring*
  - RAID 2
    - *bit-level striping* + Hamingov kod
    - poseban disk za Hamingov kod
  - RAID 3
    - *byte-level striping* + paritet
    - poseban disk za paritet
  - RAID 4
    - *block-level striping* + paritet
    - poseban disk za paritet

# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

- RAID
  - RAID 5
    - *block-level striping* + distribuirani paritet
    - paritet se distribuira po postojećim diskovima
    - moguć gubitak do 1 diska, minimum 3 diska
  - RAID 6
    - *block-level striping* + dupli distribuirani paritet
    - paritet se distribuira po postojećim diskovima
    - moguć gubitak do 2 diska, minimum 4 diska
  - ugnježdeni (engl. *hybrid*) RAID
    - 0+1
    - 1+0
  - nestandardni RAID formati

# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

- Optički diskovi
  - Zamenili floppy diskete
  - CD (engl. *compact disc*)
    - upotreba lasera za čitanje/upis
    - Red Book, IEC 908 – audio zapis
    - Blue Book, Yellow Book, itd.
      - zapis podataka (CD-ROM)
      - video materijal (Video CD)
      - fotografije (Photo CD)
      - mogućnost dopisivanja podataka (multisession, CD-XA)
  - fajl sistem ISO 9660
  - 3 vrste, zavisno od čitanja/pisanja
    - CD (read only)
    - CD-R (recordables)
    - CD-RW (rewritables)



**COMPACT**  
**dISC**

# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija masovne memorije

- Optički diskovi
  - DVD (engl. *digital versatile disk*)
    - DVD+R, DVD-R
- Poluprovodnički diskovi (SSD, engl. *Solid State Disk*)
  - zasnovani na FLASH memoriji



# **Evolucioni period arhitekture računara oko 2000.**

# Arhitektura računara IV generacije

## Dalje povećanje integracije

- ULSI (engl. *Ultra Large Scale Integration*)
- Mikroračunari dobijaju osobine velikih i mini računara
- Gubi se granica između mikro, mini i velikih računara
- Nova podela:
  - ugrađeni (engl. *embedded*) računari
  - radne stanice (engl. *desktop computer, workstation*)
  - serveri (engl. *servers*)

# Arhitektura računara IV generacije

## Ugrađeni računari

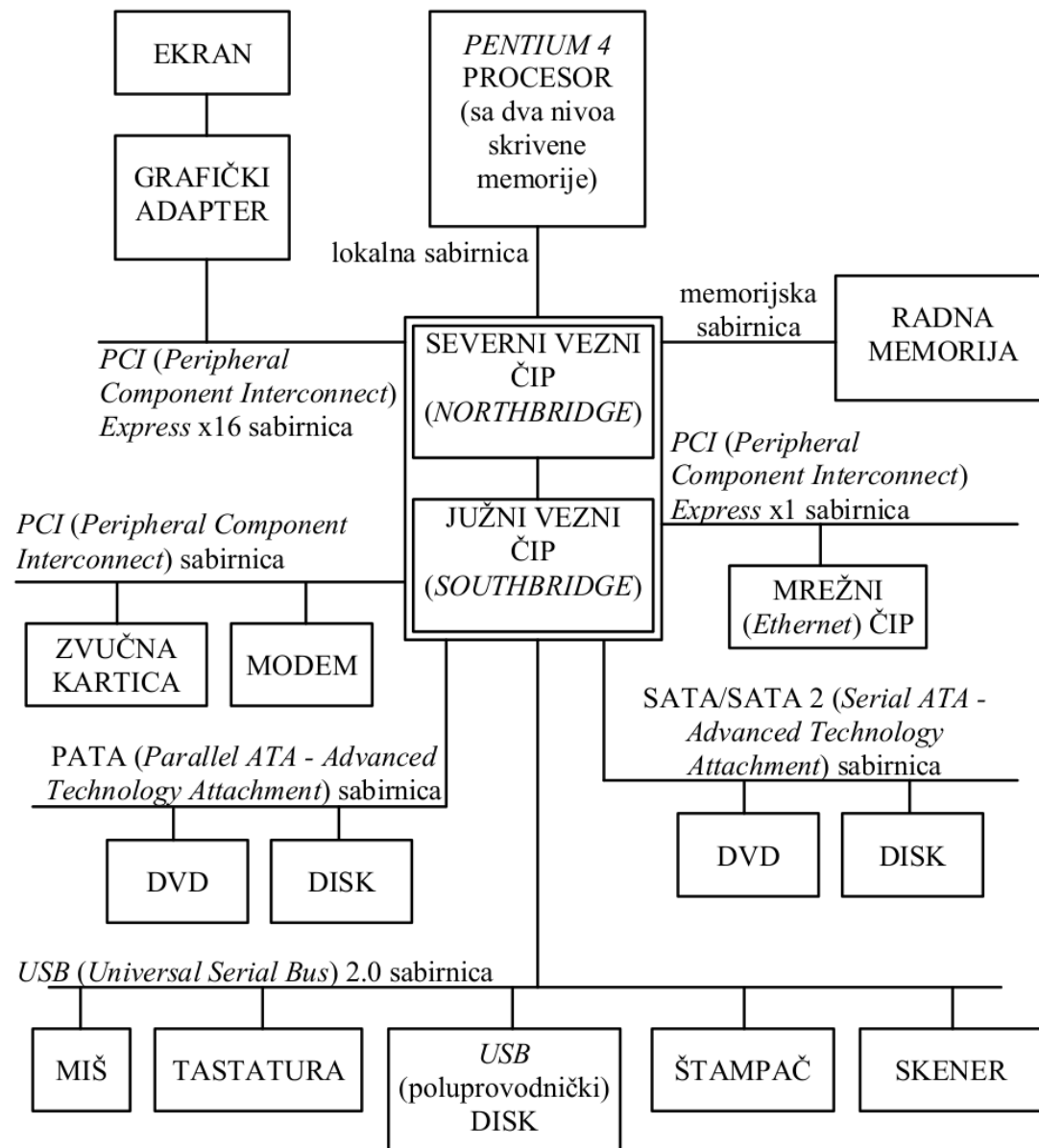
- Kontroleri/upravljački uređaji
  - industrijski pogoni
  - mala potrošnja (za baterijski napajane)
  - rad u nepovoljnim uslovima (temperatura, vlažnost,...)
  - kontroleri za HD, wireless, itd.
- Sistemi za rad u realnom vremenu (engl. *real-time systems*)
  - kontrola sistema u vozilima
- Obrada audio/video signala
  - DSP (engl. *digital signal processor*)
- Računari za jednokratnu upotrebu (engl. *disposable computer*)
  - RFID (engl. *Radio Frequency IDentification*)



# Arhitektura računara IV generacije

## Radne stanice

- Radne stanice:
  - veliki adresni prostor
  - virtuelna memorija
  - više sabirnica
  - velika masovna memorija
  - primer: Intel Pentium 4



# Arhitektura računara IV generacije

## Serveri

- Multiprocesori
  - deljena radna memorija (engl. *shared-memory systems*)
  - razmena podataka putem deljenih lokacija
  - problem konzistencije
    - više procesora
    - skrivena memorija
  - pravila ponašanja memorije (engl. *memory semantics*)
    - stroga konzistentnost (engl. *strict consistency*)
      - potpuna serijalizacija pristupa memoriji
      - smanjuje stepen paralelizma
    - sekvencijalna konzistentnost (engl. *sequential consistency*)
      - dozvoljava da čitanje ne preuzima poslednju vrednost
      - zahteva da svaki procesor vidi isti redosled upisa

# Arhitektura računara IV generacije

## Serveri

- Multiprocesori
  - COMA (engl. *cache only memory access*)
    - deljena memorija se ponaša kao skrivena
    - svaki procesor ima svoju kopiju
    - posebni protokoli (engl. *cache coherence protocols*)
  - SEQUENT NUMA-Q 2000
    - Modul:
      - 4x INTEL PENTIUM Pro
      - 4GB memorije
      - kontroler sa 32MB memorije za deljenu memoriju

# Arhitektura računara IV generacije

## Serveri

- Multiračunari
  - distribuirana radna memorija (engl. *distributed-memory system*)
  - razmena poruka
    - MPI (engl. *Message Passing Interface*)
  - super-računari
    - procesori sa sopstvenom memorijom
    - brze, namenske spojne mreže
    - MPP (engl. *massively parallel processors*)
      - CRAY T3E
        - 2048x DEC ALPHA 21164 + 2GB RAM
        - dvosmerna trodimenzionalna mreža (engl. *full-duplex 3D torus*) - 6 veza ka susedima
        - dodatna mreža za prenos poruka

# Arhitektura računara IV generacije

## Serveri

- Multiračunari
  - klasteri (engl. *cluster, cluster of workstations*) – Beowulf klaster
    - radne stanice
    - komercijalne spojne mreže
      - Ethernet
      - prekidači (engl. *switch*)
      - systemske mreže - SAN (engl. *storage or system area network*)
  - Google
    - 1 klaster – 5120 radnih stanica
      - Pentium 4
      - 512 MB memorije
      - 80GB hard disk, napajanje, hlađenje
    - ormari sa 80 radnih stanica
    - switch-evi

# Arhitektura računara IV generacije

## Paralelizam unutar procesora

- *Instruction Level Parallelism (ILP)*
  - jedna protočna struktura
  - više protočnih struktura (super-skalari)
- Spekulativno izvršavanje (engl. *speculative execution*)

```
if (a>b)
    a = a - b;
else
    b = b - a;
```

- unapred se izvrše naredbe obe grane
  - kasnije se bira koja se koristi
- problem obrade izuzetka

# Arhitektura računara IV generacije

## Paralelizam unutar procesora

- Eksplicitno obeležavanje nezavisnih delova programa – niti (engl. *thread level parallelism – TLP*)
  - unutar niti sekvencijalno
  - razne niti paralelno
- Nezavisne naredbe
  - Pronalazi ih procesor ili kompajler
    - generisanje naredbi tako da je protočni paralelizam što veći
    - pronalaženje nezavisnih naredbi
    - dugačak mašinski format naredbe VLIW (engl. *very long instruction word*)
      - računari sa eksplicitnim paralelnim naredbama EPIC (engl. *explicitly parallel instruction computers*)

# Arhitektura računara IV generacije

## Paralelizam unutar procesora

- Računari sa eksplicitnim paralelnim naredbama
  - potrebno što veće preklapanje “dugačkih” naredbi
    - izbegavanje grananja
    - predikatske naredbe (engl. *predicated instruction*)
      - prvo se proverí predikatski registar (engl. *predicate register*)
      - ako predikat (uslov) važi, izvršavaju se
      - ako ne važi, ne izvršavaju se
      - sve naredbe iz jedne grane odgovaraju istoj vrednosti predikata
      - posebne naredbe za postavljanje predikatskog registra

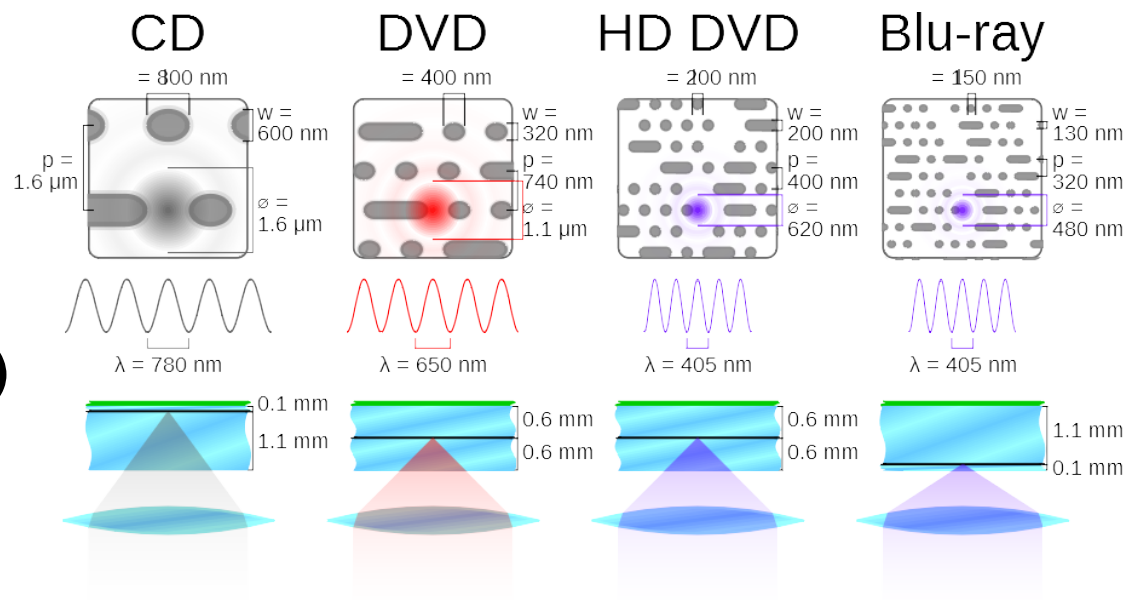
```
if (a>b)
    a = a - b;
else
    b = b - a;
```



# Arhitektura računara IV generacije

## Evolucija optičkih diskova

- Plavi poluprovodnički laser
  - manja talasna dužina od crvenog
  - razvoj završen krajem 1990-tih
  - Nobelova nagrada za fiziku 2014.
- HD DVD (engl. *High Definition/Density Digital Versatile/Video Disc*)
  - 15/30GB
  - povučen 2008.
- Blu-ray
  - 25/50GB
- UDF (*Universal Disk Format*)



# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi Intel Itanium

- RISC EPIC
- 64-bitni adresni prostor
- Registri:
  - 128× 64 bita opšte namene
  - 128× 82 bita realni brojevi
  - 64× 1 bit predikatski
  - 8× 64 bita registri za indirektne skokove (engl. *branch registers*)
  - razni namenski registri

# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi Intel Itanium

- Format naredbi
  - sve su predikatske i obavljaju se u grupama (engl. *bundle*)

41 bit	41 bit	41 bit	5 bita
--------	--------	--------	--------

- prva 3 polja su kodovi naredbi
    - kod tipa naredbe
    - kod predikatskog registra
    - ostalo zavisi od tipa naredbe
      - relativni kod naredbe
      - kodovi registara
      - ...
  - 5-bitni kod svežnja (engl. *bundle*)
    - oznaka kraja označava kraj nezavisnih naredbi
- 3 nivoa skrivene memorije

# **Evolucioni period arhitekture računara oko 2010.**

# Arhitektura računara IV generacije

## Dalje povećanje gustine tranzistora na čipu

- Prvi dvojezgarni procesori
  - IBM POWER4 PowerPC
  - AMD Athlon64 X2
  - inicijalno jednostavno 2× CPU
  - kasnije 3, 4, 6, 8, 10, 12, ...
  - omogućavaju viši nivo paralelizma
- Hibridne arhitekture
  - IBM Cell
    - 1× PowerPC
    - 8× SIMD jezgro
    - brza interna sabirnica

# Arhitektura računara IV generacije

## Procesori

- Vodeće mesto x86
- Veći ulazak ARM procesora
  - prenosni uređaji
    - PDA
    - telefoni
    - netbook/laptop
  - 2011. – prelazak sa 32 na 64 bita
  - povećanje broja jezgara
  - razdvojeni razvoj i proizvodnja
    - više proizvođača

# Arhitektura računara IV generacije

## Procesori

- IBM POWER8 12-jezgarni procesor
- SPARC 16-jezgarni
  - Fujitsu SPARC64 X+
  - Oracle SPARC T5
- Loongson 3B 8-jezgarni procesor
  - MIPS64 arhitektura naredbi
  - hardverski podržana emulacija x86
  - nastao delimično kao odgovor na kontrolisane isporuke x86 procesora

# Arhitektura računara IV generacije

## Procesori

- Istorijat ARM procesora
  - Acorn Computers
    - 1979. Acorn Atom
    - 1980. BBC Microelectronics Education Programme
    - 1981. BBC B
    - 1982. Acorn Electron
    - 1983. Acorn RISC Machine – ARM
      - delimično inspirisan sa 6502
      - dodatni procesor za BBC B
      - korišćen za simulacioni i CAD softver za razvoj ARM2
    - 1987. Acorn Archimedes, ARM
      - RISC OS





# Arhitektura računara IV generacije

## Procesori

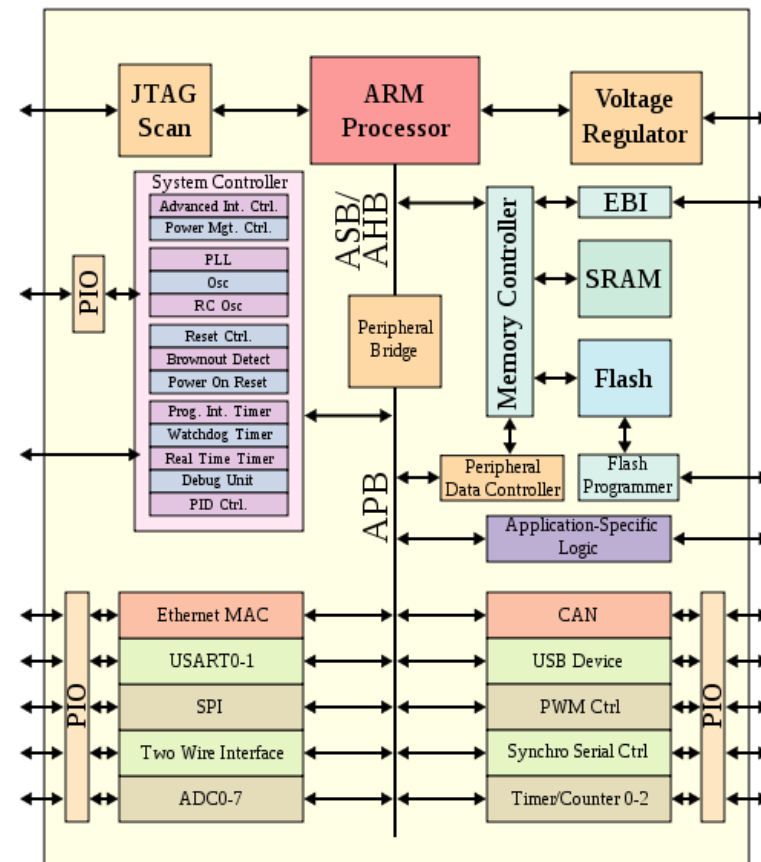
- Istorijat ARM procesora
  - Acorn Computers
    - 1989. A3000:ARM2
      - 32-bitni procesor
      - 32-bitna data magistrala
      - 26-bitni adresni prostor
    - 1991. A5000
    - 1992. A3010, A3020, A7000: ARM250, ARM3
    - 1994. RISC PC: ARM3, ARM4
  - 1990. izdvajanje ARM Holdings
    - 1992. ARM6 (saradnja sa Apple-om)
      - Apple Newton PDA
    - DEC StrongARM
    - Intel XScale



# Arhitektura računara IV generacije

## Procesori

- Istorijat ARM procesora
  - mnogo proizvođača (Samsung, Apple, Qualcomm, Broadcom, NVidia, AMD, Intel, Huawei...)
  - prenosni uređaji
  - više jezgara i SoC (engl. System-on-Chip) pristup
  - dalji razvoj jezgara
  - više od 100 milijardi ARM procesora proizvedenih do kraja 2017.



arm

# Arhitektura računara IV generacije

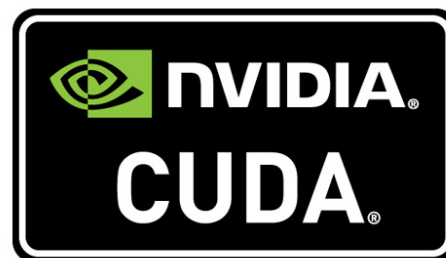
## Internet

- Globalno umrežavanje računara
- Sigurnost
  - bagovi u OS-u
  - bagovi u programima
  - mogućnost upada u sistem
    - krađa informacija (*spyware*)
    - botnet, enkripcija (*malware*)
- Praćenje korisnika
  - cookie
  - od strane ISP-a
- Anoniman pristup
  - TOR (engl. *The Onion Router*)

# Arhitektura računara IV generacije

## Grafički procesori

- Povećanje broja jezgara
  - 3D proračuni se mogu dobro paralelizovati
- Upotreba za generalne proračune – GPGPU (engl. *General-Purpose computing on Graphics Processing Units*), poznato i kao GPU Computing
  - 2007. NVidia CUDA 1.0 (Compute Unified Device Architecture)
  - 2008. otvoreni standard OpenCL 1.0
  - Nvidia Tesla, Intel Xeon Phi



# Arhitektura računara IV generacije

## Super-računari

- Top500 ([www.top500.org](http://www.top500.org)) i Green500 ([www.top500.org/green500](http://www.top500.org/green500))
- Najbrži super-računar (2020): Summit
- Uglavnom od tržišno dostupnih komponenti
- Težnja ka smanjenju potrošnje
- 2015. - 85% 64-bit x86, 97% Linux
- 2016. - 88%  $\geq 8$  jezgara, 100% Linux
- Hibridni super-računari
  - 2008 - IBM Roadrunner
    - čvor: 64bit x86 + PowerXCell
  - Intel Xeon Phi, Nvidia Tesla



# Arhitektura računara IV generacije

## Prenosni (mobilni) računarski uređaji

- Mobilni telefoni većih mogućnosti (Nokia Symbian)
- Ekran osetljiv na dodir
- Pojava “pametnih” telefona (engl. *smartphone*)
- Operativni sistemi za prenosne uređaje
  - iOS
  - Android
  - Windows Mobile
- Današnji telefoni/tableti:
  - 2,4,8-jezgarni procesori
  - više GB memorije
  - dominatno ARM procesori
  - dominatno Android/iOS

symbian  
OS



# Arhitektura računara IV generacije

## Arhitektura naredbi AMD Athlon 64/Opteron

- Prvi x86 64-bitni procesori
  - 64-bitni adresni prostor
    - PAE (engl. *Physical Address Extension*), Pentium Pro, 1995
      - dodatne adresne linije
      - i dalje 32-bitne virtuelne adrese
  - 64-bitni registri
  - ugrađen memorijski kontroler
  - registri
    - 51× sistemski registar
    - 16× 64-bit registara opšte namene
    - 8× 64-bit realni brojevi
    - 16× 256-bit SIMD registri
    - više status/kontrolnih registara
  - kompleksan mašinski format sa prefiksima i postfiksima

