Operační systémy 2

Implementace virtuální paměti

Petr Krajča

Katedra informatiky
Univerzita Palackého v Olomouci

11. říjen, 2011

Úvodem

- **x86/i386**
  - budeme uvažovat jen 32-bitové procesory z rodiny i386 (kompatibilní a novější)
  - podpora starších módů pro kompatibilitu (budeme zanedbávat)
- **AMD64**
  - označení rodiny procesorů (Intel EM64-T)
  - rozšíření i386 na 64 bitů (long mode)
  - registry rozšířeny na 64 bitů (např. EAX$\Longrightarrow$ RAX); větší počet
  - možnost adresovat rozsáhlejší pamět
- procesory se vyvíjely několik desetiletí (procesor 80386 uveden 1985) $\Longrightarrow$ relikty minulosti
- kombinují segmentaci i stránkování

Úrovně oprávnění

- čtyři úrovně oprávnění (rings)
- nelze používat některé instrukce
- zabraňují aplikacím poškodit systém
- ring 0 – nejvyšší oprávnění (jádro)
- ring 3 – nejmenší oprávnění (aplikace)
- nejčastěji se používá kombinace ring 0 + ring 3
- ostatní původně určeny pro ovladače, příp. knihovny
- mikrokernel; virtualizace (XEN)
- přechod mezi úrovněmi přes brány (gates)

Typy adres na procesorech i386

- logická adresa – vidí ji aplikace; 48 bitů (16 selektor segmentu; 32 offset); segment je často implicitní
- lineární (virtuální) adresa – v adresním prostoru procesu (32 bitů)
- fyzická adresa – ,,číslo bytu" přímo v primární paměti (32 bitů, s PAE 36); sdílená dalšími HW zařízeními; (nevyužité adresy mohou mít další použití SWAP)

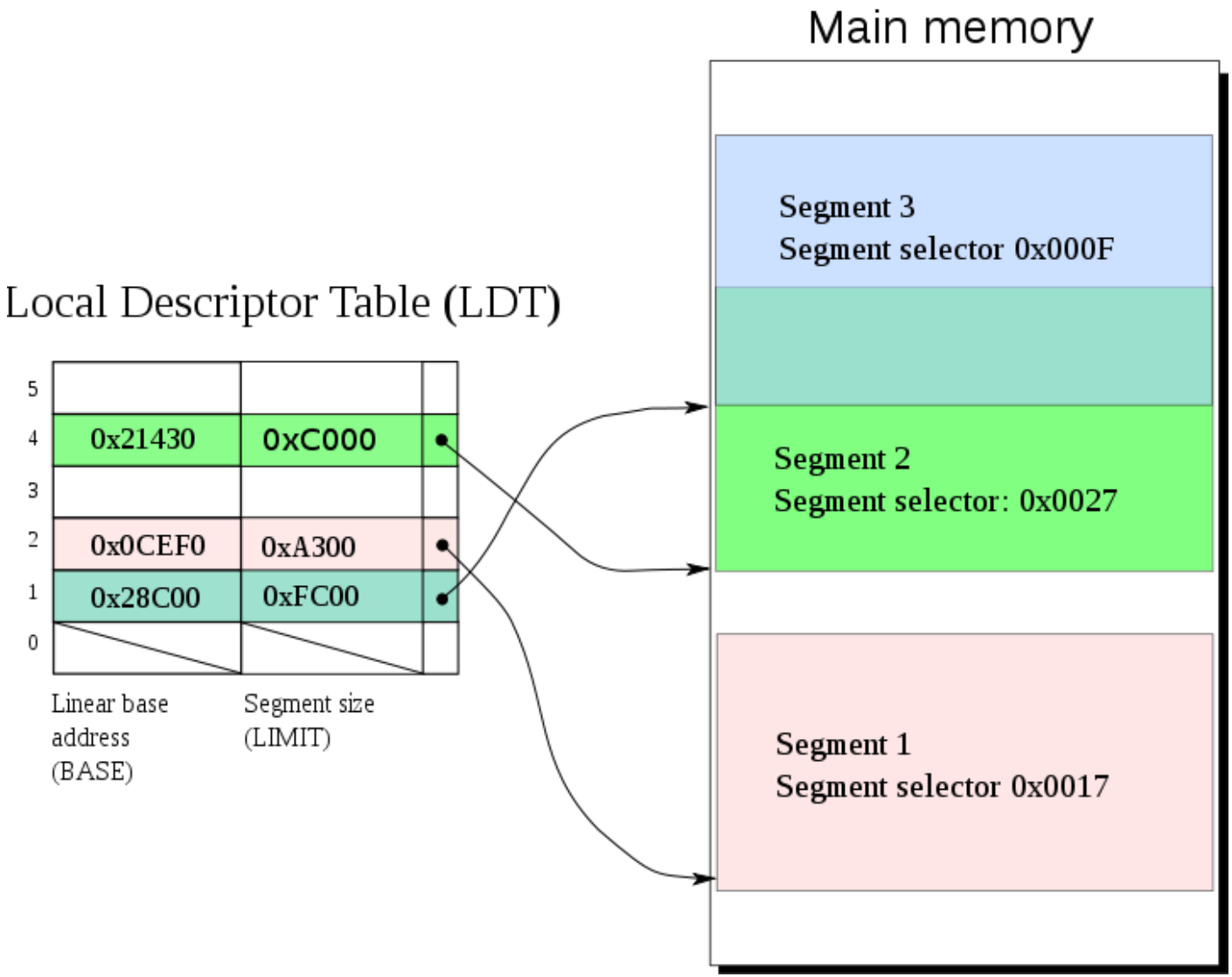
PAE: Physical Address Extenstion

- umožňuje rozšířit využitelnou pamět RAM z 4GB na 64GB (Pentium Pro a novější)
- přesměruje část adresního prostoru do jiné části fyzické paměti
- změna formátu segmentových deskriptorů
- stránky 4KB/2MB
- změna na úrovni OS (případně ovladačů);
- bez úprav jednotlivé procesy stále omezeny na 4GB (AWE)
- mimochodem přidává podporu pro NX bit

I386: Segmentace I.

- paměť je možné rozdělit na segmenty (kód, data, zásobník, etc.)
- pro každý segment lze nastavit oprávnění (ochrana paměti)
- segmenty jsou popsány pomocí deskriptorů 8 B záznam
  - báze
  - limit (velikost segmentu)
  - požadovaná úroveň oprávnění (ring 0-4)
- deskriptory segmentů uloženy v
  - Global Descriptor Table (GDT) – sdílená všemy procesy
  - Local Descriptor Table (LDT) – každý proces má vlastní
- každá může mít až 8192 záznamů
- přístupné přes registry GDTR, LDTR
- první záznam v GDT ,,null" deskriptor
- granularita (stránky vs. byty)

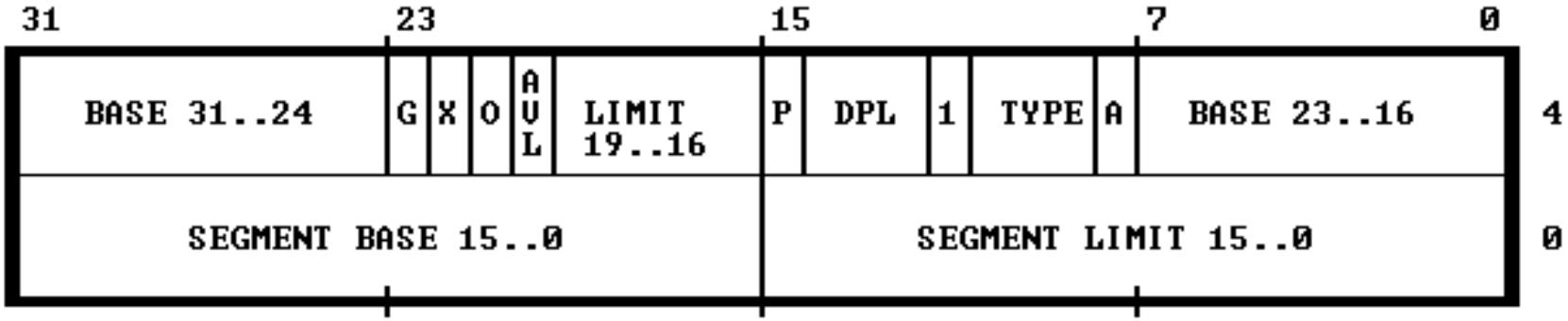
I386: Segmentace II.



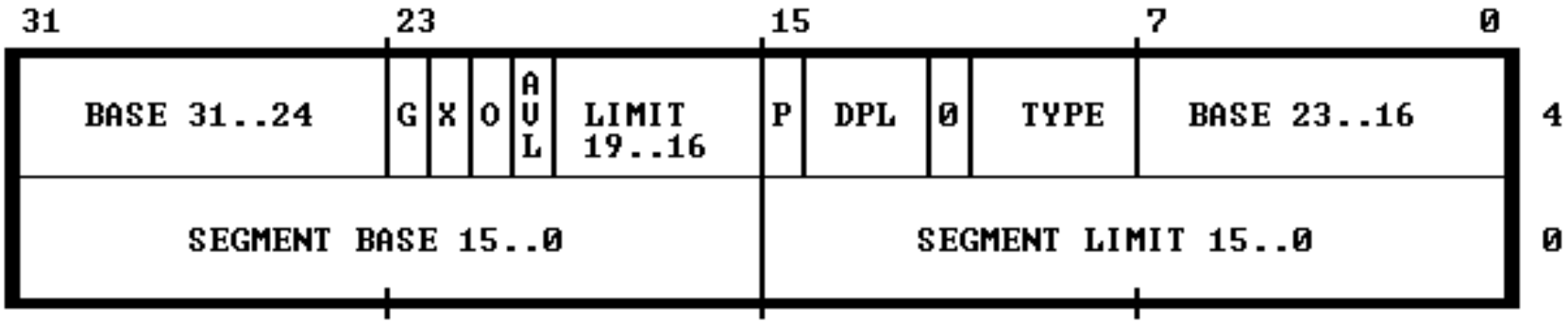
I386: Segmentace III.

Figure 5-3. General Segment-Descriptor Format

DESCRIPTORS USED FOR APPLICATIONS CODE AND DATA SEGMENTS



DESCRIPTORS USED FOR SPECIAL SYSTEM SEGMENTS

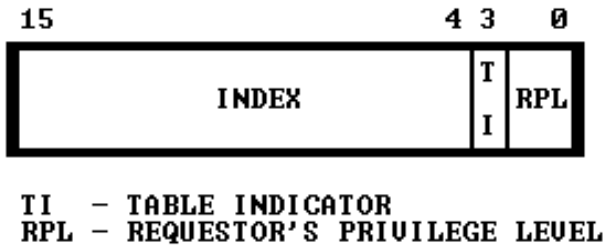


A - ACCESSED
AVL - AVAILABLE FOR USE BY SYSTEMS PROGRAMMERS
DPL - DESCRIPTOR PRIVILEGE LEVEL
G - GRANULARITY
P - SEGMENT PRESENT

I386: Segmentace IV.

- do segmentových registrů (CS, SS, DS) se ukládá selector (16 bitů) – ukazatel do GDT nebo LDT

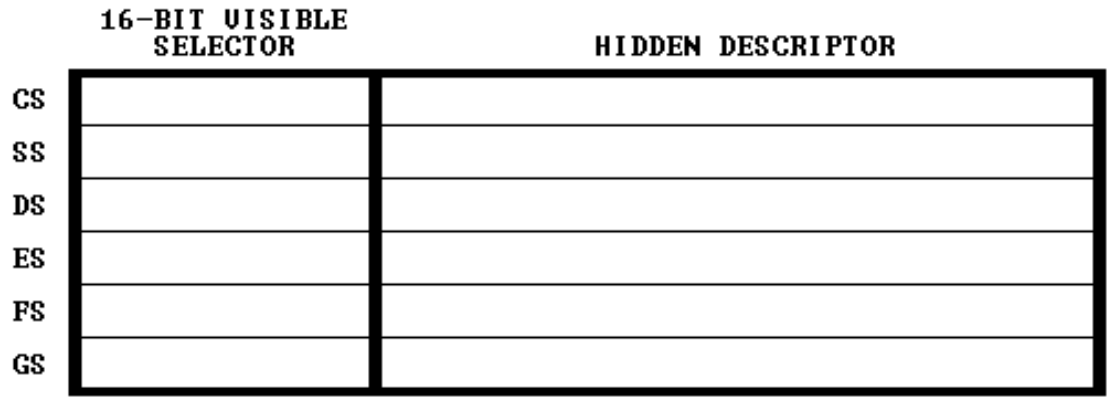
Figure 5-6. Format of a Selector



TI - TABLE INDICATOR
RPL - REQUESTOR'S PRIVILEGE LEVEL

- při načtení se do seg. registru načte i deskriptor (ale nejde k němu explicitně přistupovat)

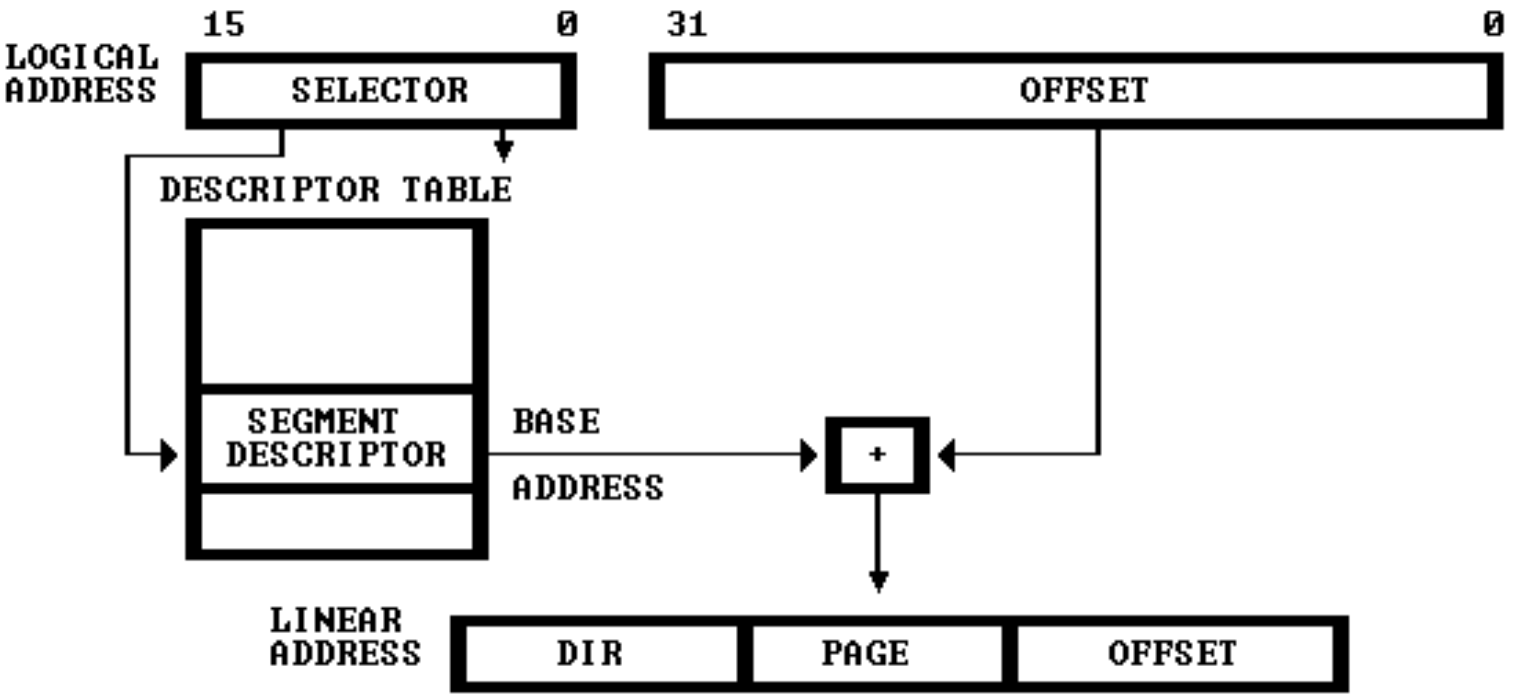
Figure 5-7. Segment Registers



I386: Překlad adres I. (segmentace)

- logická adresa $\Longrightarrow$ linární adresa (segmentace)
- ověří se oprávnění a limit (přístup za hranici segmentu) $\Longrightarrow$ neoprávněný přístup
- báze segmentu je sečtena s offsetem $\Longrightarrow$ lineární

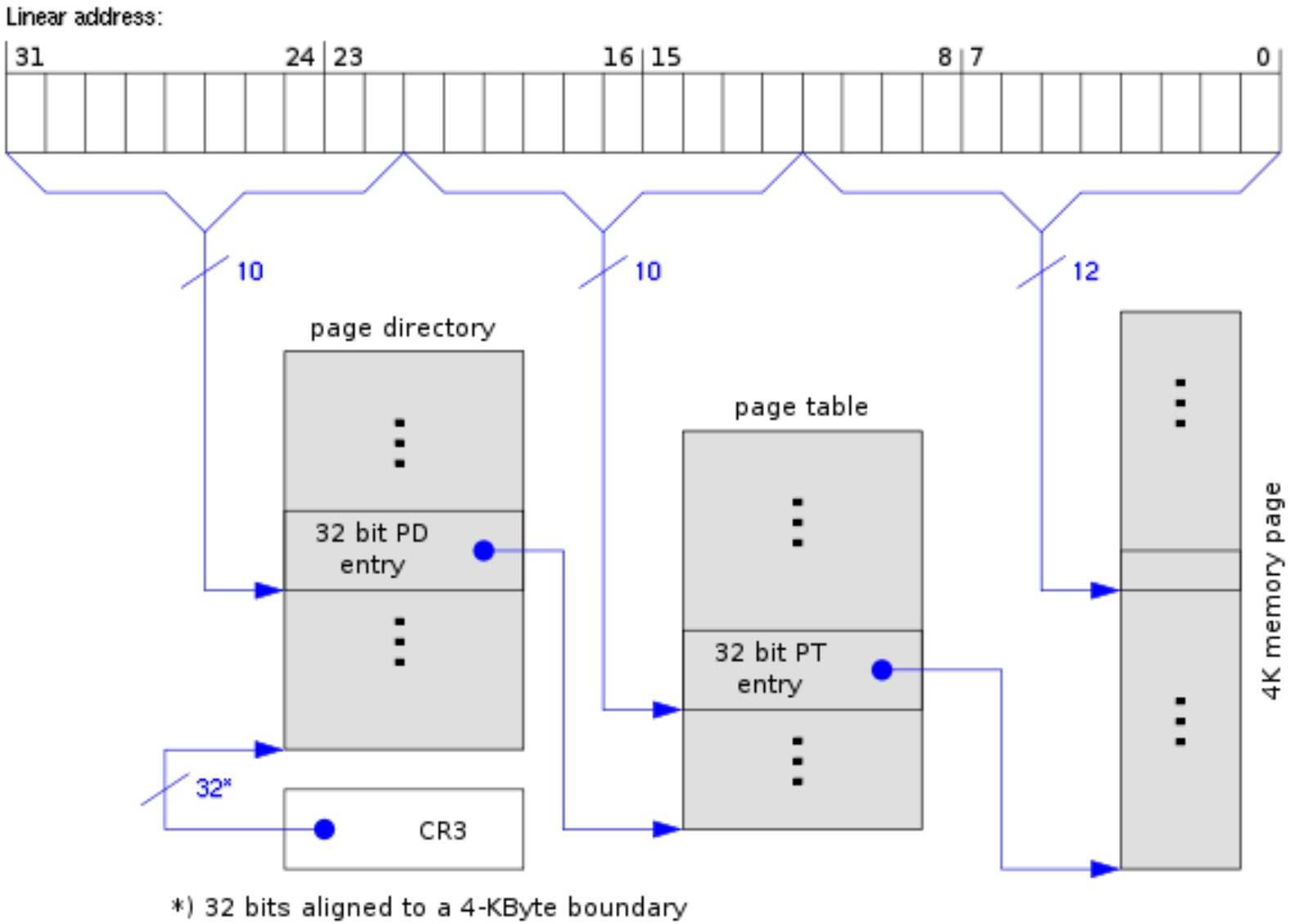
Figure 5-2. Segment Translation



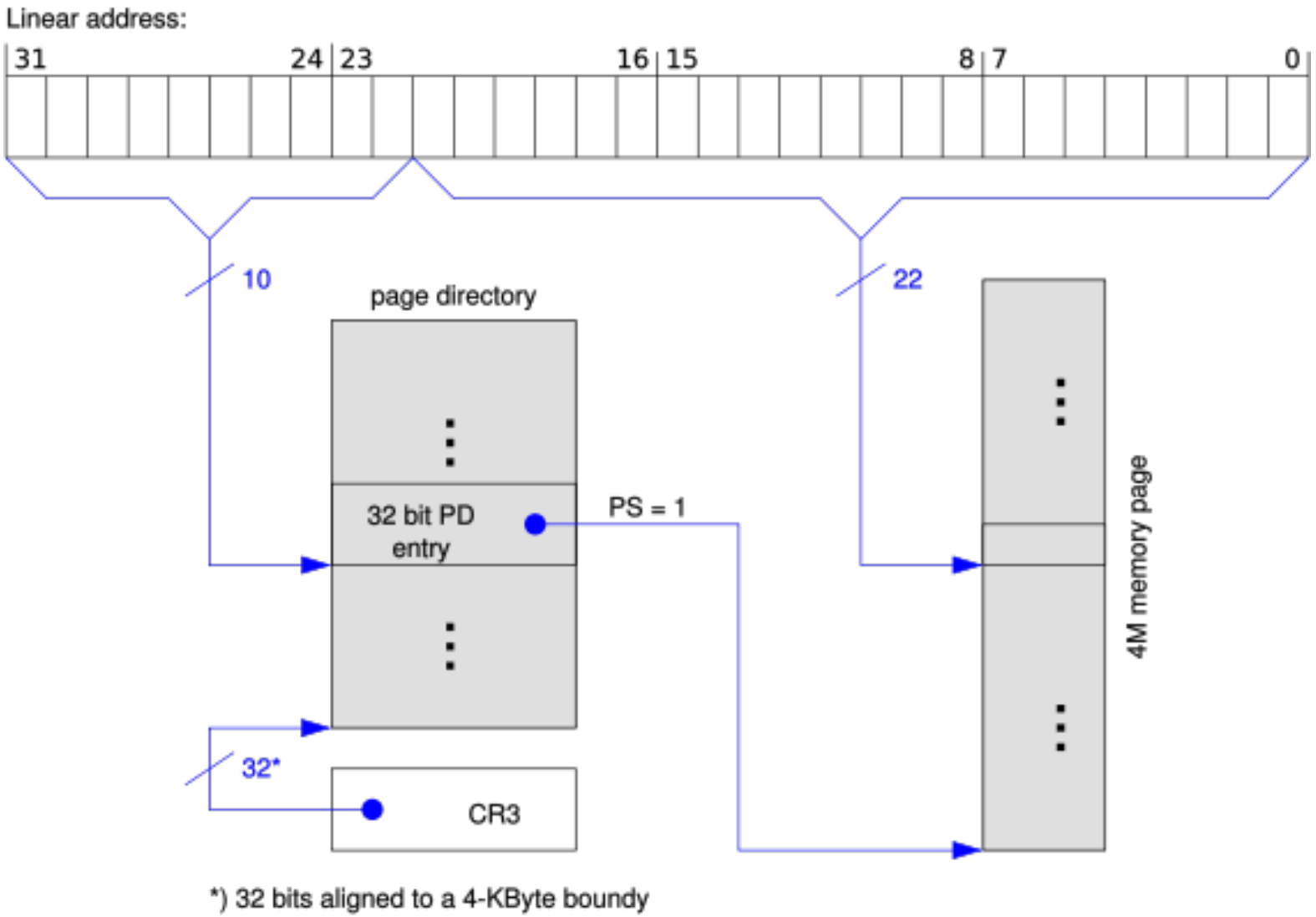
I386: Překlad adres II. (stránkování)

- linární adresa $\Longrightarrow$ fyzická adresa
- standardní stránka/rámec: 4 KB
- hierarchická struktura
  - adresář stránkovacích tabulek (Page Directory)
  - adresář stránek (Page Tables)
  - offset
- adresáře mají velikost jedné stránky, každá položka 4B $\Longrightarrow$ 1024 záznamů
- lineární adresa rozdělana na $10 + 10 + 12$ bitů (PDI + PTI + offset)
- maximální kapacita 4 GB
- adresa PDT v CR3 (zarovnanné na celé stránky)
- nastavením příznaku v PDT (pro adresu rámce se používá jen 20b), lze obejít přepočet přes PT a používat stránky velikosti 4MB (zbytek adresy je offset)
- velikost stránek lze kombinovat

I386: Překlad adres III. (stránkování – 4 KB stránka)



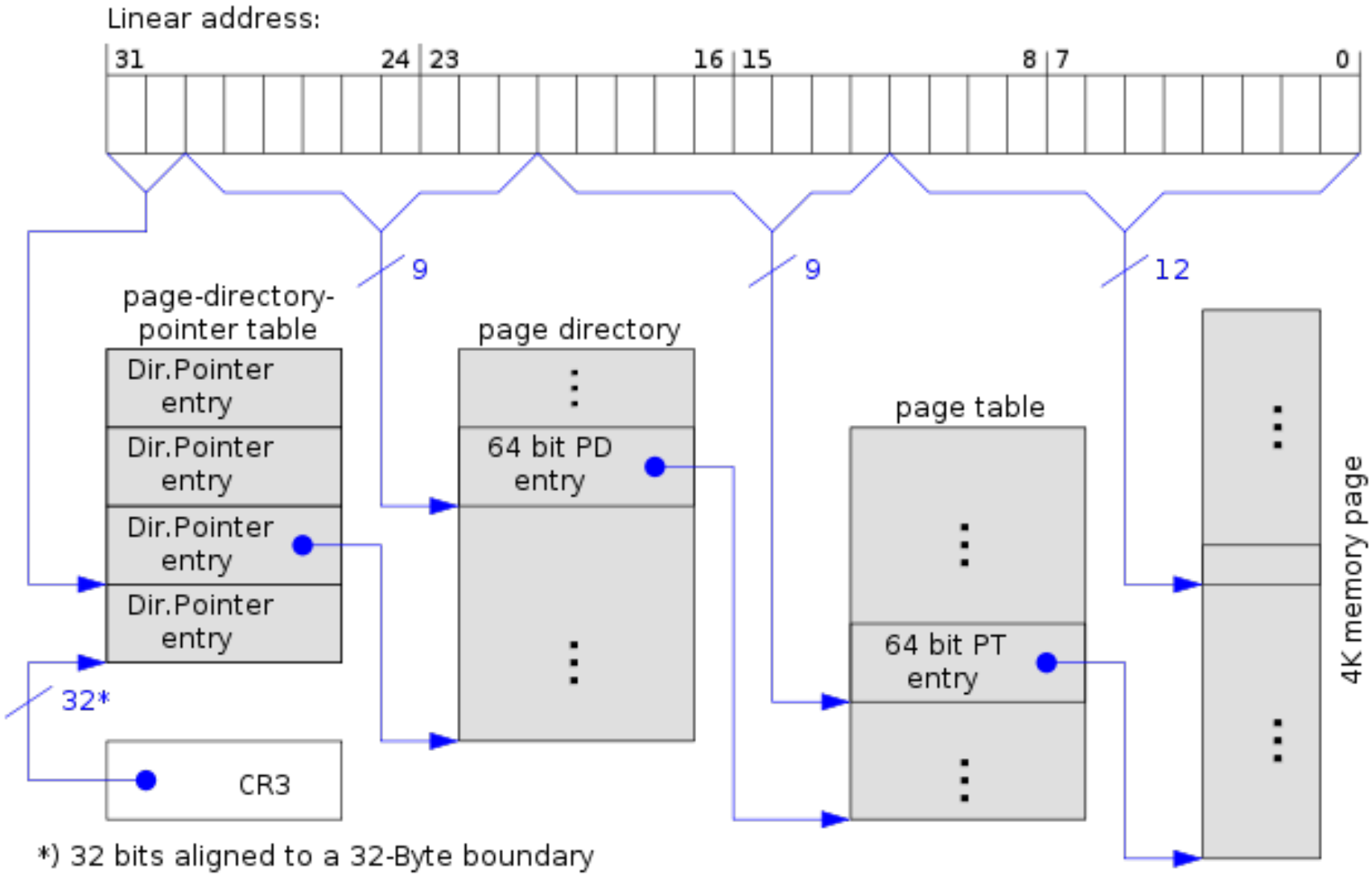
I386: Překlad adres IV. (stránkování – 4 MB stránka)



I386: Překlad adres IV. (PAE)

- od Pentium Pro
- každá tabulka 4KB, ale velikost záznamu 8B $\Longrightarrow$ 512 záznamů
- stránkování trojúrovňové
- adresa rozdělena na $2 + 9 + 9 + 12$ bitů
  - 2b – ukazatel na adresář tabulek stránek (Page Directory Pointer Index)
  - 9b – ukazatel v adresáři tabulek stránek
  - 9b – ukazatel v tabulce stránek
  - 12b – offset
- velké stránky 2MB $\Longrightarrow$ offset 21 bitů
- potenciální rozšíření

I386: Překlad adres VI. (PAE – 4 KB stránka)



AMD64: Typy adres

- segmenty existují, ale nepoužívají se k adresaci, pouze ke kontrole oprávnění
- deskriptor kódového segmentu se používá k přechodu mezi 32- a 64bitovvým režimem
- současné procesory AMD64:
  - 40bitové fyzické adresy (max. 52; způsob stránkování)
  - 48bitové logické adresy (max. 64; velikost registrů)
- možnost rozšíření $\Longrightarrow$ kanonické adresy
- nejvyšší platný bit je okopírován do vyšších bitů
- dělí paměť na tři bloky (viz Keprt str. 119)

AMD64: Stránkování

- používá se režim PAE
- zavedena čtyřúrovňová hierarchie
- záznamy v tabulkách stránek mají 8 B
- při 4KB stránkách $\Longrightarrow 4 \times 9 + 12 = 48$ adresovatelných bitů
- pro 2MB stránky vynechaná jednoúroveň, možnost použít 4 rezervované bity $\Longrightarrow$ 52 bitů
- nepoužité bity: nejvyšší – NX bit, ostatní k dispozici OS

Ochrana paměti I. (segmenty)

- ochrana paměti na úrovni segmentů je zaplá a nejde vypnout (ale jde nastavit, aby nebyla účinná)
- prováděné kontroly
  - kontrola typu segmentu (některé segmenty nebo segmentové registry můžou být použité jenom určitým způsobem)
  - kontrola velikosti segmentu (limitu), i.e., jestli program našahá za hranice segmentu
  - kontrola oprávnění
  - omezení adresovatelné domény (omezení přístupu jen k žádoucím segmentům)
  - omezení vstupních bodů procedur (brány)
  - omezení instrukční sady
- AMD64 v long mode neprovádí některé kontroly (báze a limit jsou ignorovány)

Ochrana paměti II. (stránkování)

- stránkování funguje souběžně se segmentací
- bit pro systémové stránky (zákaz přístupu z ring 3) $\Longrightarrow$ volání funkce OS (přes bránu)
- bit pro zákaz zápisu
- AMD64 + PAE mají NX bit (zákaz spouštění) $\Longrightarrow$ viry
- možnost nastavit nastavit bity na jednotlivých stránkách i adresářích $\Longrightarrow$ efektivnější

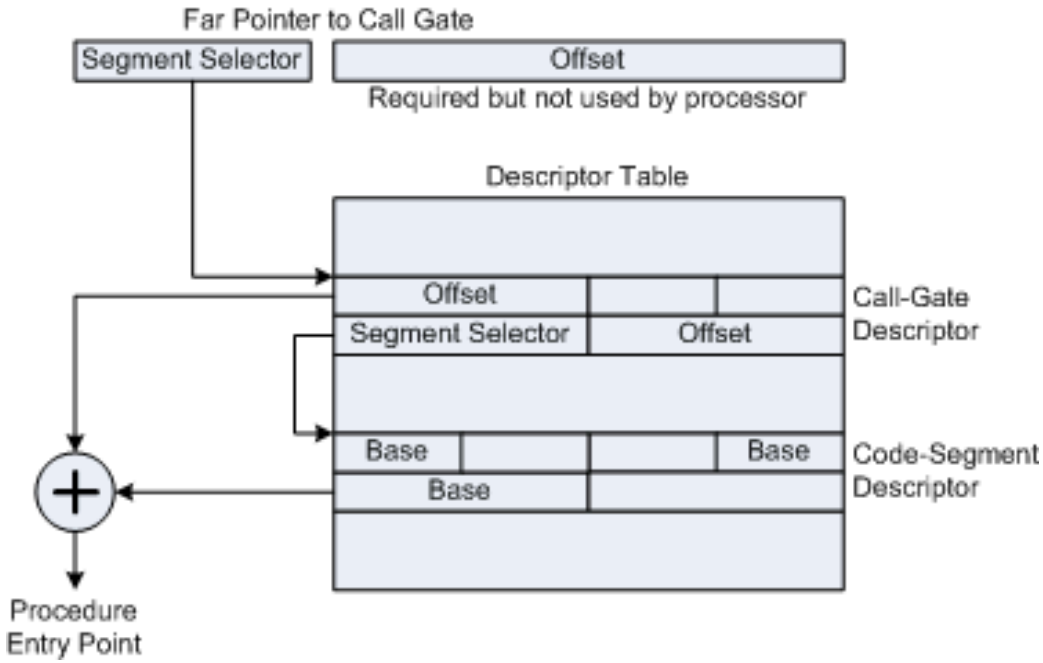
Úrovně oprávnění

- DPL (Descriptor Privilege Level) – úroveň oprávnění daného descriptoru
- CPL (Current Privilege Level) – aktuální úroveň oprávnění; odpovídá DPL v CS
- RPL (Requested Privilege Level) – úroveň oprávnění daného selektoru (požadovaná úroveň)
- pokud $max(CPL, RPL) \leq DPL$ je oprávnění v pořádku
- jinak procesor vyvolá vyjímku
- nižší hodnota $\Longrightarrow$ vyšší oprávnění)

Ochrana u CS

- přechod mezi kódovými segmenty možný přímo, přes segment TSS, přes bránu
- různé druhy bran: call-, trap-, interrupt-, task- gate (popsané v GDT)
- deskriptor volací brány obsahuje selektor a offset volaného kódu
- ověřuje se DPL brány i DPL kódového segmentu
- podle nástavení ,,bitu konformity" se případně použije zásobník pro každou úroveň oprávnění (adresy uloženy v TSS)
- nekomformní $\Longrightarrow$ změna oprávnění
- možné použít i k přepnutí režimu procesoru (např. 16-, 32- bitů)
- ústup od používaní $\Longrightarrow$ SYSENTER + SYSEXIT

Brány pro CS


Far Pointer to Call Gate
Segment Selector
Offset
Required but not used by processor
Descriptor Table
Offset
Segment Selector
Offset
Call-Gate
Descriptor
Base
Base
Base
Code-Segment
Descriptor
Procedure
Entry Point

Implementace v NT na i386

- paměť 2GB:2GB (systém + proces); lze změnit na 1:3
- je možné používat Address Windowing Extension (AWE) – zpřístupní víc než 2GB
- rozdělení stránek na volné, rezervované, komitované $\Longrightarrow$ demand paging (nulování stránek)
- množina procovních rámců (50–345); balance manager
- stránky se odswapovávají podle přístupového bitu
- načítá několik stránek současne (clustering)
- logical prefetcher umožňuje urychlit start systému (sleduje přístup na FS a vytváří log)
- používá se segmentace i stránkování
- procesy jsou navzájem oddělené (LDT)

Implementace v Linuxu na i386

- paměť 1GB:3GB (systém + proces)
- paměť rozdělena na zóny (procesy, DMA, highmem)
- podpora NUMA
- stránky v několika frontách (active, inactive)
- rozdělení stránek na volné, rezervované, komitované $\Longrightarrow$ demand paging
- OOM killer