

Shrnutí

Petr Jedlička, Cyril Klimeš, Tomáš Pitner

Předmluva

HTML · Slides · PDF | Přehled předmětu

🏁 Shrnutí za celý semestr

Modul 01: Historie

- **Vývoj podle spínacího prvku:** relé (0. gen.) → elektronky (1. gen.) → bipolární tranzistory (2. gen.) → integrované obvody (3. gen.) → mikroprocesory (4. gen.)
- **Dnes dominantní:** tranzistory MOSFET
- **Trend:** každá generace přinesla zmenšení, zrychlení, nižší cenu a vyšší spolehlivost
- **Klíč:** digitální počítač je vždy postaven na určitém typu spínacího elementu

Modul 02: Teorie architektury počítačů

- **Počítačový systém:** hardware + software (základ = operační systém)
- **Reprezentace čísel:** dvojková soustava, doplňkový kód umožňuje sčítání kladných/záporných stejným obvodem
- **Instrukce:** operační kód + adresní část, různé adresovací režimy
- **Instrukční cyklus:** načtení → dekódování → získání operandů → provedení → zápis výsledku
- **Paměťová hierarchie:** registry → cache → RAM → vnější paměti
- **Kódování:** ASCII/Unicode (UTF-8), parita, Grayův kód

Modul 03: Kombinační logika

- **Kombinační obvody:** výstup závisí pouze na aktuálních vstupech (bez paměti)
- **Booleova algebra:** umožňuje popis a zjednodušování logických funkcí (De Morganovy zákony)
- **Základní hradla:** AND, OR, NOT; odvozená NAND, NOR, XOR, XNOR
- **Sčítačky:** polosčítačka a úplná sčítačka – základ ALU
- **MUX/DEMUX:** výběr/rozdělení dat podle řídicích signálů
- **Realizace CMOS:** komplementární MOSFETy, NAND/NOR ze 4 tranzistorů

Modul 04: Sekvenční logika

- **Sekvenční obvody:** mají vnitřní stav – výstup závisí i na minulosti
- **Latch vs. flip-flop:** latch reaguje na úroveň, flip-flop na hranu hodinového signálu
- **Klopné obvody:** R-S, D, J-K; D flip-flop je nejpoužívanější
- **Registry:** paralelní (uchování více bitů), posuvné SIPO/PISO
- **Čítače:** synchronní/asynchronní, inkrementace/dekrementace
- **Praktické použití:** paměťové prvky, časování, řídicí obvody

Modul 05: Procesory

- **Von Neumann vs. Harvard:** dnes převážně hybridní přístup
- **Části CPU:** řadič, ALU/FPU, registry, cache
- **ISA vs. mikroarchitektura:** rozhraní vs. konkrétní realizace (stejná ISA ≠ stejný výkon)
- **RISC vs. CISC:** dnes se hranice stírá (x86 interně převádí na mikrooperace)
- **Techniky zvýšení výkonu:** pipeline, predikce větvení, out-of-order, přejmenování registrů, superskalárnost, SMT, SIMD
- **Dominantní ISA:** x86-64, Arm/AArch64, RISC-V

Modul 06: Strojový jazyk, assembler

- **Strojový kód vs. assembler:** assembler = lidsky čitelný zápis, překlad assemblerem
- **Programátorský model:** registry, příznaky, paměťový prostor, instrukční sada
- **Typy instrukcí:** přenos dat, aritmetické, logické, řídicí, zásobníkové, I/O
- **Intel 8080 příklad:** akumulátor A, registry B–L, páry BC/DE/HL, SP, PC
- **Počet operandů:** 0–3; více operandů = méně instrukcí, ale složitější kódování
- **x86-64:** 64bitové registry RAX–R15, RIP, RFLAGS, vektorové registry XMM/YMM/ZMM

Modul 07: Paměti

- **Účel:** uchování programu a dat (volatilní i nevolatilní)
- **Parametry:** kapacita, přístupová doba, šířka přenosu, chybovost
- **Paměťová hierarchie:** registry → L1/L2/L3 cache → hlavní RAM → vnější paměti
- **SRAM vs. DRAM:** SRAM rychlejší (cache), DRAM hustší/levnější (hlavní paměť), DRAM vyžaduje refresh
- **Adresování:** po bajtech, zarovnávání dat pro efektivitu
- **Typy:** ROM, PROM, EPROM, EEPROM, Flash, HDD, SSD, pásky, optická média

Modul 08: Pokročilé architektury počítačů

- **Měření výkonu:** doba odezvy vs. propustnost, benchmarky (SPEC CPU)
- **Pipeline:** zvyšuje propustnost, řeší konflikty forwardingem/stallingem + predikcí skoků
- **Paralelismus:** ILP, vícejádra, SMT, SIMD/vektorové instrukce
- **Superskalární/VLIW:** snaha maximalizovat počet prováděných instrukcí za cyklus
- **Koherence & NUMA:** důležité u vícejádrových systémů se sdílenou pamětí
- **Netradiční směry:** tok dat, systolické pole, neuronové a kvantové počítače

Modul 09: Sběrnice a propojení

- **Sběrnice:** komunikační kanál pro přenos adres, dat a řídicích signálů
- **Typy přenosu:** paralelní vs. sériový, synchronní vs. asynchronní, simplex/half/full-duplex
- **Sdílení média:** arbitráž, CSMA/CD, CSMA/CA, multiplexování
- **Hierarchie:** různé nároky → různé sběrnice (rychlostní rozdělení)
- **Vývoj:** FSB → QPI → PCI Express (point-to-point)
- **Externí rozhraní:** USB, bezdrátová propojení, průmyslové sběrnice

Modul 10: Grafické adaptéry, GPU

- **Účel:** generování obrazu do framebufferu a jeho neustálé obnovování na displeji
- **Rastr vs. znaková grafika:** dnes plný rastr; framebuffer roste s rozlišením a barevnou hloubkou
- **Anatomie:** GPU + videopaměť (GDDR/LPDDR/HBM) + řídicí logika
- **Dedikované vs. integrované:** vlastní paměť/výkon vs. úspora místa/energie
- **Unified memory:** společný adresní prostor CPU–GPU (méně kopírování)
- **GPGPU:** dnes využití i pro AI, výpočty, ray tracing, upscaling (DLSS/FSR/XeSS)

Modul 11: Periferie počítačů

- **Periferie:** vnější zařízení rozšiřující funkce počítače (vstup/výstup/kombinovaná)
- **Vstupní:** klávesnice, polohovací zařízení, čtečky karet/čárových kódů, mikrofony
- **Výstupní:** monitory/displeje, tiskárny (2D i 3D), reproduktory/sluchátka
- **Kombinovaná:** webkamery, multifunkční zařízení
- **Princip:** komunikují přes rozhraní/sběrnice (USB apod.)
- **Důležitost:** bez periferií je počítač prakticky nepoužitelný

Modul 12: Počítače pro řízení technologických procesů

- **Průmysl 4.0:** IIoT, digitální dvojče, decentralizace, automatizace
- **Hierarchie automatizace:** úrovně 0–4 (Field/Device → Control → Supervisory → MES/Plant → Enterprise)
- **Průmyslové sítě:** Profinet, EtherNet/IP, EtherCAT, Modbus TCP, POWERLINK
- **Modbus TCP:** jednoduchý, ale nevhodný pro tvrdý reálný čas
- **Průmyslové počítače:** odolné vůči teplotě, vibracím, prachu; často bez ventilátoru
- **Typy:** Panel PC, Box PC, Embedded PC, rackové systémy

Rozšiřující informace

Polovodičové spínací prvky

- Schopnost na základě (slabého) podnětu (napětí či proud) spínat větší výkony.
- Nebo lze použít jako *zesilovač*:
- malá změna na vstupu → velká změna na výstupu (10x-100x i vícekrát).

Polovodičové materiály

Prvky

- Germanium (Ge),
- Křemík (Si),
- Selen (Se)

Sloučeniny

- karbid křemíku (SiC),
- nitrid galia (GaAn)

Křemík (Silicon)

- po selenu a germaniu nejdéle a dodnes nejšířeji používaný polovodivý prvek
- běžně dostupný, jeden z nejběžnějších prvků v zemské kůře
- výroba polovodičového křemíku je nicméně dosti náročný proces (čas, energie, suroviny)
- obecně až po finální polovodičový čip 600-1200 výrobních kroků

Křemík v zemské kůře

Pořadí	Prvek	Přibližný podíl (% hmotnosti)
1	Kyslík (O)	46,6 %
2	Křemík (Si)	27,7 %
3	Hliník (Al)	8,1 %
4	Železo (Fe)	5,0 %
5	Vápník (Ca)	3,6 %

Fáze výroby čipů

- čipy = integrované obvody obsahující jednotky, desítky, spíše však až desítky miliard elementárních prvků (tranzistory, rezistory, diody, evt. kapacitory)
- obecně až po finální polovodičový čip 600-1200 výrobních kroků

1. Těžba a rafinace křemene

- Získává se křemenný písek s velmi vysokou čistotou.
- V pecích se redukuje na technický (metalurgický) křemík pomocí uhlíku.
- Dále se chemicky čistí na elektronicky čistý křemík (čistota aspoň 99,9999999 % — tzv. 9N).

2. Výroba monokrystalu

- Taví se *ultračistý křemík*.
- Pomocí krystalového zárodku se z taveniny vytahuje *monokrystal* (ingot).
- Jde o válec o průměru *150 až 300 mm* (6—12 palců).
- Výsledkem je jednotná krystalová struktura → monokrystal.
- Czochralského metoda



3. Řezání ingotu na plátky (wafery)

- Ingot se řeže na tenké plátky (wafers) o tloušťce cca 0,5–1 mm.
- Wafers se leští a čistí na atomární úroveň → připravené pro litografii.

4. Litografie a výroba tranzistorů /1

Proces, který se opakuje stovky kroků (pro desítky vrstev):

Oxidace

Vytvoření izolační vrstvy (SiO□).

Fotolitografie

Na wafer se nanese fotorezist, který se osvítí přes masku (šablonu obvodu).

Leptání (etching)

Odstranění odhalených oblastí vrstvy.

4. Litografie a výroba tranzistorů /2

Implantace iontů

Přesná úprava vodivosti dopováním (např. bor, fosfor).

Depozice

Nanesení kovů nebo dalších vrstev (např. měď, kobalt, dielektrikum).

CMP (Chemical Mechanical Planarization)

Zajištění rovinnosti povrchu.

Tento cyklus se opakuje pro každou vrstvu obvodu — čip může mít 50-100 vrstev, z nichž každá se vyrábí extrémní precizností.

5. Testování na waferu (wafer probing)

- Pomocí mikroskopických sond se ověřuje funkčnost čipů přímo na waferu.
- Nefunkční čipy se označí → při řezání se vyřadí.

6. Řezání waferu a balení (packaging)

- Wafer se řeže na jednotlivé dies (čipy).
- Čipy se montují do pouzdra (např. BGA, QFN, LGA) → elektrické propojení přes bondovací drátky, pájecí kuličky apod.
- Následuje zalití, chlazení, přidání rozvaděčů tepla.

7. Finální testování a třídění

- Ověření elektrických parametrů, výkonu, spotřeby, stabilního chodu.
- Čipy se třídí podle kvality a výkonu (tzv. binning).
- Nakonec se balí pro distribuci.

8. Distribuce výrobcům zařízení

- Čipy jdou do počítačů, telefonů, aut, routerů, satelitů atd.

Shrnutí jako výčet fází

1. Těžba a rafinace křemene
2. Výroba monokrystalu (ingot)
3. Řezání a leštění waferů
4. Vícekroková litografie a výroba tranzistorů
5. Testování čipů na waferu
6. Řezání a pouzdření čipů
7. Finální testování a třídění
8. Distribuce výrobcům

Karbid křemíku (Silicon carbide)

- Materiál s *velkou tvrdostí* (na Mohsově stupnici 1-10 hodnota 9,5), "křemíkový korund"
- Tradičně se v práškové slisované/spečené formě používá jako brusný materiál (*karborundum*), do ochranných destiček.
- Náhražka *diamantu* (tvrdost 10) do ložisek
- Moderní polovodičový materiál pro *výkonové prvky* (power semiconductors)
- Na rozdíl od brusiva musí být ve formě *monokrystalu*.

SiC součástky

- SiC součástky se vyznačují vyšším maximálním závěrným napětím (= snese stovky až tisíce V).
- Snesou vyšší proudy (desítky až stovky A).
- Lze udělat se stejnými nebo lepšími parametry součástku menší než při použití Si.
- Výroba monokrystalu SiC je ovšem značně delší a energeticky náročnější než Si.

Další výhody SiC

- Výrazně lepší spínací vlastnosti a vyšší spolehlivost než tradiční křemíkové součástky.
- Díky absenci zpětného zotavovacího proudu, teplotně nezávislému spínání a vynikajícím tepelným vlastnostem představuje karbid křemíku novou generaci výkonových polovodičů.

Přínosy pro systémy

- nejvyšší účinnost,

- vyšší pracovní frekvenci,
- zvýšenou hustotu výkonu,
- snížené elektromagnetické rušení (EMI),
- zmenšení rozměrů a nákladů na celý systém

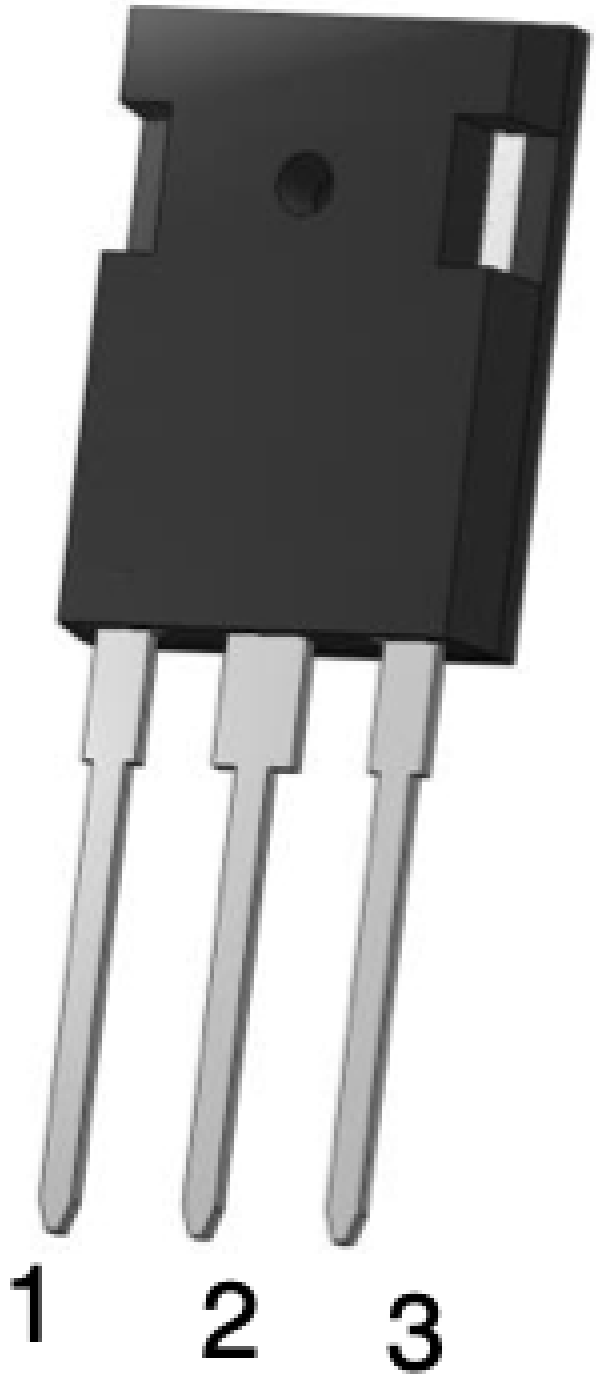
Česká stopa: produkty OnSemi

- produktová řada EliteSiC
- tranzistory JFET/MOSFET, Schottkyho diody a napájecí moduly
- pro vysokonapěťové a vysokofrekvenční aplikace,
- elektromobily, průmyslové pohony, solární invertory a nabíjecí stanice

Součástky ze SiC

- příklad Silicon Carbide (SiC), Cascode JFET - EliteSiC, Power N-Channel, TO247-3, 1200 V, 80 mohm
- Schottkyho diody OnSemi FFSM0665A

EliteSiC, Power N-Channel JFET



Nitrid galia (GaN)

- Obdobně jako u SiC: vynikající elektrické a tepelné vlastnosti,
- GaN ideální pro aplikace vyžadující vysokou účinnost, rychlé spínání a kompaktní rozměry:
- výkonová elektronika,
- vysokofrekvenční zařízení (RF)
- optoelektronika (lasery).

GaN výrobky: příklad Infineon (Německo)

- CoolGaN™ tranzistory (60—700 V) s vysokou účinností a rychlým spínáním.
- Aplikace: Průmyslové napájecí zdroje, spotřební elektronika, elektromobily.
- První výrobce, který začal produkovat GaN čipy na 300mm waferu.