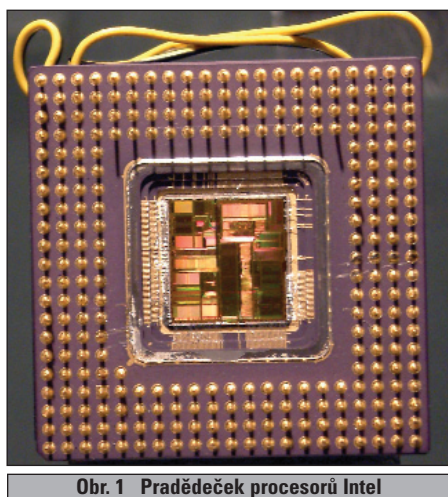


# Na okraj Moorova zákona

Rozhovor s Gordonem Moorem, který byl otištěn v minulém čísle ST, opět probudil mezi čtenáři diskuze o mezích současných technologií a fyzikálních hranicích, které zřejmě ukončí platnost Mooreova zákona v jeho dnešní interpretaci. Ve zhruba osmnáctiměsíčních intervalech potřebných k přípravě a zahájení výroby obvodů s dvakrát větší hustotou tranzistorů se v odborné veřejnosti vedou nové a nové diskuze o tom, zda již bylo dosaženo prognostiky očekávaného „kritického bodu“, kdy přestává platit ona v praxi dosud fungující lineární závislost růstu hustoty polovodičových prvků v omezeném prostoru křemikové struktury čipu. O stručné shrnutí a realistické hodnocení současného stavu, trendů v oblasti vývoje mikroelektroniky a technologií výroby polovodičových struktur jsme proto požádali autoritu z řad odborné veřejnosti nad jiné povolovanou, pana doc. Julia Foita z elektrotechnické fakulty Českého vysokého učení technického.

**Jak vidíte, pane docente, platnost „Moorova zákona“ ve světle současných trendů ve vývoji elektronických systémů, omezení ze strany fyzikálních bariér a perspektivy mikroelektronických technologií?**

Pokud jde o Moorův zákon, sám Moore se zcela jasně vyjadřuje v tom smyslu, že zvyšování hustoty integrace (složitosti integrovaných obvodů) nemůže pokračovat do nekonečna ze zásadních fyzikálních důvodů. Základním činitelem omezujícím hustotu integrace je samotná struktura hmoty v tuhé fázi, jmenovitě mřížková konstanta monokrystalu základního materiálu. Rozměry funkčních detailů současných špičkových součástek (délka kanálu unipolár-



Obr. 1 Pradědeček procesorů Intel

ních tranzistorů) jsou stále ještě o víc než o řád větší (65 nm proti asi 5 nm), ale dosti rychle se už této mezi blížíme.



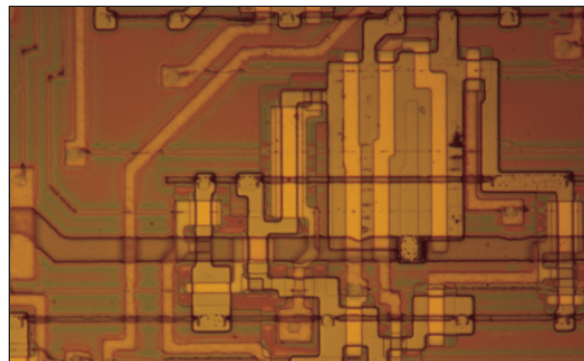
Doc. Ing. Julius Foit, CSc.

Kromě toho je třeba brát v úvahu skutečnost, že dalším zmenšováním rozměrů součástek (přibližováním k velikosti mřížkové konstanty) se začíná měnit charakter transportu nosičů náboje: z transportu ovládaného rozptylovými mechanismy (srážkami s atomy krystalové mřížky) se stává transport balistický, čímž se podstatně mění charakteristické vlastnosti součástek. To znamená, že součástek s balistickým transportem by se nemohlo užívat, nicméně přinesou i svého druhu revoluci v obvodovém řešení, a to jak vnitřního uspořádání integrovaných obvodů, tak i periferií.

Výhledově se počítá s možnostmi dostat se s funkčním principem aktivních elektronických součástek ještě hlouběji, ovládnutím spinu elektronů (viz příspěvek prof. J. Kodeše v letošní ST6 na str. 3) v atomech základního materiálu, teoreticky do rozměrů jediného atomu. Navíc se od tohoto funkčního principu očekává významné snížení nároků na spotřebu energie a konstrukci napájecích zdrojů.

To přímo souvisí i s dalším omezujícím činitelem při zvyšování hustoty integrace. Při zmenšování rozměrů součástek a navíc ještě při zvyšujícím se provozním kmitočtu prudce vzrůstá množství tepla uvolňovaného na jednotku objemu integrovaného obvodu. Vede to k těžko řešitelným problémům s chlazením. V poslední době vedl tento chladič problém ke stálému zmenšování napájecího napětí složitých integrovaných obvodů (z původních typických 5 V na 3,3 V; 1,7 V a níže), opět zde ale narážíme na meze. Mimo jiné se snížením napájecího napětí zhoršuje odolnost obvodů a soustav proti elektromagnetickému rušení (pasivní EMC) a náhodným signálům (šumu).

Při dalším zvětšování hustoty integrace (zmenšování součástek a zvětšování jejich počtu v jediném integrovaném obvodu) začínají doléhat i problémy ekonomické. Jak se konstatovalo např. na nedávné mezinárodní konferenci ECS '05, již dnes dospěla situace tak daleko, že počet ročně ve světě vyrobených tranzistorů (převážně v integrovaných obvodech) už převyšuje počet rýžových zrn z obvyklé roční celosvětové produkce, a výrobní náklady na jeden tranzistor jsou menší než výrobní náklady na jedno zrnko rýže. Situace se však začíná měnit v tom smyslu, že zavádění nových pokročilých výrobních technologií integrovaných obvodů je tak drahé, a jejich morální životnost se tak zkracuje, že jejich užití pozvolna přestává být rentabilní, není-li zaručen okamžitý masový odbyt. Pokud by, například v souvislosti s ropnou krizí nebo z nějaké jiné příčiny, nastal celosvětový hospodářský útlum, lze očekávat i prudké zpomalení rozvoje technologie polovodičů.



Obr. 2 Příklad vnitřní struktury čipu – zdroj ASICentrum Praha

Ještě jeden činitel může v blízké budoucnosti prudce omezit platnost Moorova zákona: testovatelnost integrovaných obvodů. Už dnes totiž platí, že náklady na měření a testování složitých integrovaných obvodů v průběhu jejich výroby (zejména to platí pro obvody analogové a obvody pracující se smíšenými signály) výrazně převyšují náklady na samotnou jejich technologickou realizaci, nemluvě o časové náročnosti měření a testování, která ve skutečnosti také představuje významnou složku výrobních nákladů. Nedá se ovšem vyloučit, že dojde k nějakému zásadnímu objevu v testovací metodice, který tuto překážku odstraní bez zhoršení jakosti a spolehlivosti složitých integrovaných obvodů.

**Děkujeme za skutečně vyčerpávající odpověď.**

Jik, Noh