

Tajné plány výrobců procesorů

Při hledání alternativ křemíkových čipů si výrobci neradi nechávají nahlížet do karet a s oblibou odkazují na společnou "roadmap", která vede až do roku 2018. Avšak ve skutečnosti jsou už vývojáři mnohem dál. Chip zjišťoval, co "Intel & Co." opravdu plánují.

S precizností hodinového stroje žene polovodičový průmysl výkon svých procesorů výš a výš. Ty počítají a ukládají do paměti při stále rychlejších pracovních frekvencích - v roce 2010 bude dosaženo 10 GHz. Plány však jdou ještě dále: ve společném vývojovém "itineráři", který dnes sahá až do roku 2018, si výrobci s až úzkostlivou přesností vymezili překážky, jež musí být překonány, aby se zamýšlený výkonnostní přírůstek dal realizovat. Ale firmy jsou samozřejmě o krok dál, než otevřeně přiznávají. V tajných plánech Intelu a AMD je vpád do nanosvěta zamýšlen mnohem dříve, než předpokládá veřejnosti přístupná "roadmap". A IBM a Infineon (výrobce paměťových, komunikačních a dalších čipů) ve svých laboratořích již nyní rozlouskly problémy, které jsou oficiálně považovány za neřešitelné na ještě dlouhá léta.

Odhad vývoje procesorů a trhu v této oblasti zveřejnil Gordon E. Moore velmi brzy: "Každé dva roky se zdvojnásobí počet tranzistorů, které mohou být umístěny na jednom čipu," prorokoval spoluzakladatel Intelu už v roce 1965. K neustálému růstu přispívají hlavně tři složky: zlepšování designu, větší plochy čipů a litografické postupy, které umožňují vytvářet stále menší struktury. V roce 1975 pak Moore svou prognózu, známou dnes také jako "Moorův zákon", upřesnil: "Hustota obvodů polovodičového prvku se zdvojnásobuje každých osmnáct měsíců."

Většina mikroprocesorů se dnes vyrábí 130nanometrovým procesem, přechod na 90nanometrovou technologii je v běhu. Jeden nanometr (nm) je miliontina milimetru. Z Moorova zákona se už dávno stalo jakési přikázání, čeho má být dosaženo. Spekulace o tom, kdy vlastně bude potenciál křemíku definitivně vyčerpán, jsou neustále korigovány ve prospěch delšího časového úseku. "Žádný exponenciální vývoj netrvá věčně, ale tuto 'věčnost' ještě můžeme trochu oddálit," zavěštil si 75letý Moore v loňském roce.

ROADMAP VYJMENOVÁVÁ VŠECHNY TECHNOLOGICKÉ PŘEKÁŽKY

Jakkoli se může zdát snadné to, že průmysl neustále zvyšuje svůj růst, vynaložené prostředky jsou enormní. Tam, kde se už naráží na fyzické hranice materiálu, je stále svízelnější odstraňovat z cesty všechny bariéry. "International Technology Roadmap for Semiconductors" (ITRS) proto uvádí odhady technických požadavků. Na tomto rozsáhlém díle, které detailně popisuje úkoly pro příští léta, se od roku 1998 podílejí všichni velcí výrobci polovodičů z Evropy, USA, Japonska, Koreje a Tchaj-wanu, stejně jako vládní místa, konsorcia a univerzity.

Tento dokument je prošpikován spoustou tabulek, v nichž jsou jednotlivé požadavky barevně kódovány. Bílá znamená úlohy, jejichž řešení jsou již uskutečňována ve výrobě. Žlutě jsou označeny problémy, pro něž jsou známa možná řešení. Čím dále zasahují tabulky do budoucnosti, tím více dominují červená pole, tedy požadavky, na které dosud nikdo nezná realizovatelnou odpověď - tak zní oficiální vysvětlení. Ve skutečnosti se za mnohými z těchto červených polí už skrývají nově vyvinuté technologie, ty však výrobci zatím drží pod pokličkou.

"Roadmap je dobré vodítko, ale určitě ne poslední amen," naznačuje situaci dr. Manfred Engelhardt z výzkumného oddělení Infineonu. Tento výrobce už má údajně vyvinuta řešení většiny problémů, které jsou v "cestovní mapě" červeně zakresleny až do roku 2018. Také Intel a AMD, členové ITRS, jsou již mnohem dál, než tento dokument udává: podle svých interních podkladů obě společnosti chtějí vyrábět čipy se strukturami 22 nm už v roce 2011 - pět let před oficiálním termínem.

DVĚ PROCESOROVÁ JÁDRA A OBŘÍ CACHE NA JEDNOM ČIPU

Až dosud představil průmysl každé dva roky novou technologii. "Pro příští dvě generace to ještě bude dále platit, potom se počítá se zvětšením odstupe inovací na tři roky," myslí si dr. Michael Raab, technologický ředitel firmy AMD. I tříletý rytmus však ještě považuje za "velmi agresivní" přístup k věci. Raab očekává, že přes sto milionů tranzistorů dnešního procesoru bude brzy možno umístit na podstatně menší plochu. Pak by na křemíkovém substrátu (die) zbylo místo třeba ještě na další procesorové jádro. Na takovýchto "dvoujádrových" řešeních už pracují jak AMD, tak Intel. Raab také odhaduje, že procesorová cache (vyrovnávací paměť) se během příštích pěti let zvětší až na 4 MB. "Spojení výpočetní jednotky a velké části paměti na jediném velkém čipu by mohlo přinést mimořádný nárůst výkonu," prorokuje.

Vzdor společně vynaloženému úsilí celého průmyslového odvětví zůstává konkurenční boj nadále tvrdý. "Technologie má ohromný vliv na další vývoj," říká dr. Engelhardt. Soutěž v polovodičové branži se však bude rozhodovat především ve výrobě. "Kdo vyrábí ekonomičtěji, bude vítězit." Ekonomické přitomen je využívat existující technologie tak dlouho, dokud to jde. Zvláště to platí pro současné litografické výrobní postupy, na nichž závisí velikost struktur čipu.

Do poloviny devadesátých let se pracovalo s viditelným světlem. Dnes se křemíkový plátek (wafer, chcete-li, též "oplatka") osvětluje ultrafialovým laserem o vlnové délce 248 a 193 nm. Z fyzikálního hlediska se zdá zcela nemožné takovýmto nástrojem vytvářet daleko jemnější struktury dnešních 130- a 90nanometrových čipů. Přesto se to daří - díky řadě takřka kouzelnických triků. Jedním z nich je tzv. nelineární fotolak. Tento lak dokáže světelný paprsek, zaostřený čočkami, soustředit ještě jemněji. Pro využití v současném, 90nanometrovém procesu je navíc nutné světelné vlny ještě dodatečně "obelstít". K tomu slouží masky pro obrácení fáze, které v každém druhém otvoru otočí orientaci světla o 180°, což zdvojnásobí rozlišovací schopnost (viz obrázek dole).

Zda se podaří s vlnovou délkou 193 nm zvládnout i další vývojový stupeň, o tom se průmysl vyjadřuje opatrně. Pro rok 2007 roadmap předpokládá 65nanometrové struktury; Intel a AMD by se podle vlastních důvěrných plánů měly touto dobou dostat již na struktury s 45 nm. Proto se přemýšlí nejen o ultrafialovém světle ještě kratší vlnové délky 157 nm, ale i o použití kapalin, jako je voda nebo olej, které by se při osvětlování křemíkového plátu měly postarat o silnější lom světla.

OSVÍCENÍ VE VAKUU: EXTRÉMNÍ ULTRAFIALOVÉ SVĚTLO JE POHLCOVÁNO DOKONCE VZDUCHEM

Podle dnešního stavu vědomostí se ultrafialovým světlem jemněji osvětlovat nedá. Hlubší průnik do nanosvětla si výzkumníci slibují od tzv. extrémního ultrafialového světla (EUV). Jeho vlnové délky od 11 do 14 nanometrů leží hluboko pod hranicí viditelného světla a blíží se už rentgenovým paprskům. Tak krátkovlnné záření je však pohlcováno jakýmkoliv prostředím, a tedy i vzduchem. Proto se celý proces osvětlování musí odehrát ve vakuu. Kromě toho nelze, na rozdíl od dosavadní praxe, použít transparentní masky a čočky. EUV světlo je proto vedeno pomocí vysoce reflektivní zrcadlové optiky.

Pro rychlejší výrobu čipů nebude trvale možné jen technicky realizovat zjemňování struktur a hnát se za stále vyššími počty tranzistorů, aby byly dodrženy "závazky" plynoucí z Moorova zákona. Čím hlouběji se technologie noří do nanometrové oblasti, tím závažnější problémy se objevují. S každým dalším tranzistorem stoupá potřeba čipu, který se tak více zahřívá. Částečně by se tento efekt dal vyrovnat kratšími vodivými drahami. Ale čím jemnější jsou elektrické vodiče, tím méně volnosti mají nosiče náboje: vzhledem k častějšímu rozptylu na postranních stěnách vodiče vzrůstá elektrický odpor.

Kvůli zvýšení vodivosti již dávno hliník nahradila měď. Jelikož však atomy mědi pronikají do křemíkového podkladu a tak polovodič znečišťují, obalují se měděné dráhy tenoučkou "slupkou" z tantalu. Propustnost nevodivců působí při snižování tloušťky materiálu další problém: tunelové efekty, známé z kvantové mechaniky, dovolují téci proudům tam, kde to je nežádoucí. Horečné hledání nových izolačních materiálů se již vyvinulo v opravdovou "tajnou vědu". Namísto elixíru mládí či kamene mudrců jsou však žádané materiály "High K", pojmenované tak podle zkratky pro materiálově závislou dielektrickou konstantu.

Pro zvýšení vodivosti v nejtenčích křemíkových vrstvách vymysleli v IBM nový trik: "předpjatý" křemík. Křemík se napaří na křemíkogermaniovou podložku, jejíž atomy mají větší vzájemné vzdálenosti. V tomto svazku zaujme i křemík větší rozestupy v mřížce, což vede ke snížení jeho elektrického odporu (viz schéma na str. 40).

DROBOUČKÉ "NANOTRANZISTORY" SPÍNÁJÍ STÁLE NESPOLEHLIVĚJI

Potíže s izolujícími a vodivými vrstvami mají za následek, že tranzistory spínají čím spolehlivěji, čím jsou menší. Tomu by měl zabránit vývoj dvou- nebo tříbránových (dual-gate nebo tri-gate) tranzistorů, u nichž napětí řídí ne jedna "gate", ale dvě či tři. Kromě vícenásobné regulace se při stupňovité stavbě zvětšují kontaktní plochy polovodičových vrstev.

Pokud si tempo vývoje podrží svou dynamiku, vodivé dráhy čipů dosáhnou do dvaceti let velikosti pouhých molekul. Pak už namísto zákonů klasické fyziky nastoupí především kvantové efekty. S těmi jsou ale vývojáři konfrontováni již nyní - nejtenčí vrstvy na dnešních "waferech" mají tloušťku jen několika atomových pozic.

Velmi slibné východisko se zdá přicházet ze samotného nanosvětla: jde o uhlíkové nanotrubičky. Tyto makromolekuly, které se skládají z uhlíkových atomů uspořádaných do kostry z šestiúhelníků, jsou zformovány do tvaru maličkých protáhlých dutých válců. Mohou dosáhnout délky až 1 mm a průměr mají od 0,4 až do více než 100 nanometrů. V závislosti na své geometrii se chovají buď jako kov, nebo jako

polovodič. Jejich předností je vysoká pohyblivost nosičů náboje v trubičkách, až 200krát větší než v křemíku. Přitom vzdorují proudovým hustotám až do 1010 A/cm². Pro srovnání: měď se taví již při 107 A/cm².

V Infineonu se již podařilo využít uhlíkové nanotrubičky i k výrobě výkonových polovodičů. Dále by se však jako zajímavá mohla ukázat náhrada měděných vedení filigránským uhlíkem. Potřebné know-how už vývojáři mají: na určených místech vyleptávají v čipu otvory a pomocí katalyzátoru v nich přimějí k růstu nanotrubičky.

Vzdor stoupajícím nákladům na vývoj a výrobu klesají ceny jednotlivých čipů, neboť ve výrobních cyklech se vyrábí najednou stále více součástí. Za tím účelem se např. každých pět let zvyšuje průměr používaných křemíkových plátků. V roce 1970 wafer o průměru 50 mm skutečně připomínal jakousi sušenku. Roku 1990 to křemíkové kotoučky dotáhly na 150 mm, o pět let později byly zavedeny pláty o průměru 200 mm a v roce 2000 začal přechod na 300 mm. Z "oplatky" této (přímo "lázeňské") velikosti lze "na jeden zátaň" vyrobit dvakrát více čipů než z dřívějšího rozměru.

Pokud jde o technické hledisko, mohly by být pláty ještě větší. Přesto se zůstane u plátů 300milimetrových - z ekonomických důvodů. Podle názorů expertů je totiž trh příliš malý, než aby dokázal vstřebat ještě větší počty vyrobených kusů. V této oblasti se ostatně Moore zásadně zmýlil: v sedmdesátých letech předpokládal, že průměr waferu dosáhne v roce 2000 půldruhého metru.

Manfred Flohr, autor@chip.cz

DALŠÍ INFORMACE

public.itrs.net
www.intel.com/research/silicon
www.intel.com/education/makingchips

OTOČENÉ SVĚTLO

Obraceč fáze změny vrchol vlny na její důl. Je-li takovým filtrem opatřen každý druhý otvor litografické masky, překrývající se části vlny se už nesčítají, ale vzájemně se ruší. Intenzita světla, která je pro osvětlení rozhodující, tak získá vyšší rozlišovací schopnost.

OPTICKÁ KONTROLA

Na měřicím stanovišti 300milimetrové výrobní linky se pod šikmým osvětlením provádí závěrečná kontrola křemíkového plátku. Výroba čipu trvá šest týdnů. Pláty se přitom podrobí 20 až 30 výrobním operacím. Vysoké nároky jsou kladeny na preciznost: v každém kroku musí být plátek pozicován s nanometrovou přesností.

NANOTRUBIČKY

Uhlíkové nanotrubičky (Carbon NanoTubes, CNT) lze na čipu využít k rozvádění napětí (Line) - jako přemostění (Via) mezi vrstvami (modře), nebo dokonce jako tranzistory.

PŘEDPJATÝ KŘEMÍK:

Křemíkogermaniový podklad donutí atomy křemíku, za normálních okolností uspořádané hustěji, aby v mřížce zaujaly větší rozestupy. V tomto tzv. "předpjatém" křemíku se pak elektrony mezi atomy pohybují volněji.

JEMNÁ PRÁCIČKA

Lidský vlas v pravé části obrázku je přibližně stokrát větší než struktury na čipu. Osvícení křemíkových plátů se provádí v litografických čistých prostorech, jako zde u firmy Infineon (vpravo).