

# Zákonitosti elektronických systémů budoucnosti

Dějištěm International EDA Tech Forum 2004 americké firmy Mentor Graphics se týden po přistoupení České republiky k Evropské unii stala Praha. Fórum bylo příležitostí seznámit se s nejnovějšími trendy v oblasti návrhu elektronických systémů – integrovaných obvodů, progra-

a trendy vývoje elektronických systémů budoucnosti.

**Arnošt Lustig přežil holocaust. Přesto je optimista. Jste rovněž optimista vezmeme-li v úvahu uplynulou nelehkou periodu elektronického průmyslu?**



**Walden C. Rhines, generální ředitel a předseda rady ředitelů společnosti Mentor Graphics Corporation**

Před tím, než se v říjnu 2003 stal CEO společnosti Mentor Graphics, byl výkonným viceprezidentem polovodičové divize společnosti Texas Instruments (TI). Do společnosti TI přišel v roce 1972 pracoval zde na mnoha pozicích v oblasti technického i obchodního managementu, a to nejen v divizi polovodičů ale i v divizi spotřební elektroniky a v centrálních výzkumných laboratořích. Od roku 1985 do roku 1987 byl prezidentem divize datových systémů TI. V průběhu svého působení ve společnosti TI byl zodpovědný za vývoj řady produktů, mimo jiné prvních součástek pro syntézu řeči (používaných ve známém elektronickém učíteli Speak&Spell) a digitálních signálových procesorů řady TMS. Roční výnosy v oblasti mikroprocesorů a ASIC se pod jeho vedením zvýšily z 10 miliónů na 2 miliardy USD.

movatelných hradlových polí, systémů SoC (System on the Chip) s analogovými i digitálními signály (Mixed-Signal), embedded aplikací, desek plošných spojů i kabelážních systémů.

*K jedinečnosti tohoto setkání bezpochyby přispěla i účast dvou významných osobností dneška: spisovatele a scenaristy Arnošta Lustiga, letošního držitele Ceny Americké akademie umění a literatury za celoživotní dílo, a vizionáře v oblasti elektronických systémů, Waldena C. Rhinese, generálního ředitele a předsedy rady ředitelů společnosti Mentor Graphics Corporation.*

Zatímco podle Arnošta Lustiga nelze najít definici pro sjednocenou Evropu (podobně jako ji nelze najít pro spravedlnost, lásku a solidaritu), nelze podle Waldena Rhinese považovat Mooreův zákon za „ústavní“ pro elektronické systémy. V exkluzivním rozhovoru pro časopis *Sdělovací technika* jsme měli možnost položit Waldenu Rhinesovi několik otázek. Jeho odpovědi naznačují zákonitosti

Ano jsem optimista. Pamatuji řadu recesí, roky 1974, 1985 představovaly velice těžká období, stejně jako zatím nejhlubší recese v roce 2001. Vždy bylo třeba znovu hledat rovnováhu mezi dodávkami a poptávkou, ale dlouhodobě elektronický průmysl prosperuje. Platí to speciálně pro polovodičový

efektivní. Existuje tedy bod, kdy dodatkové náklady na miniaturizaci se již nevyplácí v porovnání s přínosem, který přináší elektronické funkce obvodu. To je důvod proč máme čipové moduly obsahující více čipů vrstvených na sobě (stack chip systems), proč se zvyšuje složitost desek plošných spojů, to je důvod, proč architekti čipů dnes nevyužívají maximálně možnosti technologie. A to bude ještě více platit v budoucnosti. Řada pokročilých technologií bude mít svoji cenu a pouze náročné aplikace budou schopny ji ospravedlnit.

**Před čtvrtstoletím byly často diskutovány limity křemíku. Jaká je „křemíková ústava“ dneška a zítřka?**

Křemík je úžasný materiál, který průmysl využívá od vynálezu křemíkového tranzistoru na počátku 50. let, GaAs byl užitečný pro některé speciální aplikace, podobně jako InP a další materiály A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>, a myslím, že totéž platí dnes pro SiGe, avšak pro předvídatelnou budoucnost, pro komoditní polovodičové součástky má křemík stále dostatek schopností. Myslím si tedy, že ještě dlouho bude převládajícím polovodičovým materiálem.

**Jaký je Rhinesův zákon?**

Jednou ze zajímavých věcí, týkající se Mooreova zákona a stupně integrace, je, že multičipové systémy se stávají jednočipovými. Podívejme se na kalkulátor společnosti Texas Instruments z roku 1972, měl 480 součástek, v roce 1980 měl takový kalkulátor jediný integrovaný obvod. V 70. letech jsem řídil skupinu návrhářů u Texas Instruments a inženýři mi říkali, že pro to,

Společnost Mentor Graphics Corp. představuje technologickou špičku v oblasti automatizace návrhu elektronických systémů EDA (Electronic Design Automation). Poskytuje softwarová i hardwarová řešení, která umožňují rychlejší a nákladově efektivnější vývoj elektronických výrobků. Společnost nabízí inovativní řešení pro stále komplikovanější úkoly při návrhu desek plošných spojů a čipů. Jako jediná společnost v sektoru EDA nabízí řešení v oblasti embedded softwaru.

průmysl, kde výrobní objemy trvale rostou. Pokud je příliš mnoho výrobních kapacit, ceny klesají a nastává recese, víme, že nárůst objemů výroby se zastaví, ale pak přijde oživení a s ním inovace, nové technologie a nové způsoby aplikací elektronických součástek a s tím i růst, který lze předvídat.

**Má Mooreův zákon nějaká omezení?**

Šířku čáry můžete zmenšovat donekonečna, problémem je, co bude ještě nákladově

abychom mohli mít jediný čip musíme mít proces, který je schopen podporovat více technologií – CMOS, MOS s kanálem P, s kanálem N, bipolární technologie, BiCMOS, technologie pro odpory a kondenzátory. Skupina inženýrů chtěla vyvinout velice složitý proces, který by všechny tyto prvky byl schopen realizovat – bipolární ovladače pro displej, MOS pro velkokapacitní paměti, CMOS pro pohotovostní režim. Co se ve skutečnosti stalo

v průběhu následujících 10 let, bylo, že jsme všechno uměli udělat v technologii MOS s kanálem P. Proč? Protože to byla nejlevnější technologie ze všech jmenovaných. Takže můj zákon pro integraci zní: Multičipové systémy se integrují do jediného, který namísto supermnožiny všech technologií použitých v multičipovém řešení používá jedinou technologii, která představuje nejméně nákladný společný jmenovatel všech požadovaných technologií.

#### Co si z toho vzít pro budoucnost?

Podívejte se na dnešní mobilní telefon. Před pěti lety měl tento mobilní telefon přibližně 200 součástek, včetně pasivních součástek, odporů a kondenzátorů. Mnoho lidí mi říká, že celulární telefon by mohl být nakonec realizován jako jediný čip. Možná, že mají pravdu. Ale v případě, že se tak stane bude to komoditní integrovaný obvod CMOS. Nebude to obvod na bázi GaAs, či SiGe; nebude to žádná nákladná technologie, bude to nejmenší společný jmenovatel (z hlediska nákladů) všech těchto technologií. Možná, že to nebude jednočipové řešení, možná bude radiofrekvenční část zvlášť. Ale pokud by to byl jediný čip, Rhinesův zákon říká: Jenochipové řešení představuje vždy nejmenší společný jmenovatel všech obsažených technologií a nikoliv největší společný jmenovatel.

#### Jaké by mohly být ty „kouzelné krabičky“ za několik stovek dolarů, které by se mohly stát motorem elektronického průmyslu zítřka?

Proč stovek dolarů? Vždyť typickým stimulem jsou vždycky produkty vyráběné ve velkých objemech, které jsou tedy obvykle levné. Např. na počátku 70. let minulého století to byly elektronické kalkulačky, na počátku 80. let pak osobní počítače. Dnes je to spotřební elektronika, která je motorem nových aplikací. Pokud se tedy díváme do budoucnosti nacházíme se právě v období, kdy spotřební elektronika je stimulem pro nejvíce vzrušující nové technologie. Nejvýkonnější čipy se dnes vyrábějí pro videohry. Další velkou výzvou jsou obvody pro mobilní telefony, kapesní PDA. A pokud se podíváme ještě dále do budoucnosti, jsou to např. etikety s transpondérem RFID, kterými bude opatřeno nejen veškeré zboží ve skladech, ale bude je mít každý člověk, každé zvíře. Tedy součástky, které se budou počítat na miliardy a ne na desítky milionů. Existuje-li něco, co má každý člověk a může to jednoduše vyhodit, jedná se skutečně o velkoobjemovou výrobu, po které je největší poptávka. V oblasti nákladnějších produktů to v příštích dvou letech budou produkty pro audio a video komunikaci.

**Jaké jsou typické trendy v návrhu integrovaných obvodů a elektronických systémů? Jak bude vypadat typický integrovaný obvod a typický elektronický systém, řekněme v roce 2010?**

Co je nejobtížnější, je dělat návrh systémů s lidmi, kteří dosud dělali jen návrh jednotlivých součástek, popř. mít návrháře, kteří pracovali jen s křemíkem. Zde je tedy jedna z výzev pro společnosti zabývající se

## Nanoelektronika a mezihvězdný prach

Přírodní uhlík může existovat v několika formách. Většina z nás zná grafit a diamant. Avšak existuje i třetí typ – fullereny. Ty bývají chybně označovány za novou formu uhlíku. Ve skutečnosti fullereny byly objeveny v mezihvězdném prachu i v geologických formacích na Zemi. Jsou to velké uhlíkové molekuly ve tvaru klece.

Uhlíkové nanotrubicice CNT (Carbon NanoTube) jsou fullerénové struktury, které jsou tvořeny graphenovými válci uzavřenými na obou koncích čepičkami obsahujícími pentagonální prstence. Graphen je uhlíková vrstva struktury grafitu, jejíž povahu lze přiblížit analogií s polycyklickým aromatickým uhlovodíkem.

Zjednodušeně řečeno, CNT jsou rozsáhlé makromolekuly, které si můžeme představit jako lístky grafitu (hexagonální mřížka uhlíku) srolované do válce.

#### Krátká historie vývoje

Uhlíkové nanotrubicice objevil v roce 1991 japonský odborník na elektronovou mikroskopii Sumio Iijima, který studoval materiál usazený na katodě při syntéze fullerenu odpařováním v obloukovém výboji. Krátce na to Thomas Ebbesen a Pulickel Ajayan ze stejné laboratoře předvedli, jak je možné nanotrubicice vyrábět ve velkém množství tím, že se mění podmínky odpařování v obloukovém výboji. Tyto objevy otevřely cestu k explozi výzkumu fyzikálních a chemických vlastností uhlíkových nanotrubic v laboratořích po celém světě.

Významnou událostí v tomto úsilí byla v roce 1993 syntéza jednostěných nanotrubic SWNT (Single Wall NanoTube). Standardní metoda odpařování v obloukovém výboji umožňuje vytvářet pouze vícevrstvé trubice MWNT (Multiple Wall NanoTube), kdy jedna válcová trubice je uvnitř další atd. Přidáním příměsí kovů, jako je např. kobalt, do grafitových elektrod je možno vytvářet extrémně tenké trubice se stěnami tvořenými jedinou vrstvou. Teprve dostupnost těchto struktur umožnila experimentální ověření některých předpokladů týkajících se vlastností nanotrubic.

Nanotrubicice mají několik nanometrů v průměru, jsou tedy přibližně 10tisíckrát tenčí než lidský vlas, a jejich délka se pohybuje v řádu mikrometrů, v současné době dosahuje až jednoho milimetru. CNT mohou být buď vodivé nebo polovodivé a nabízejí ohromující možnosti pro vytváření nanoelektronických součástek budoucnosti. Mohou být využity jako ultraminiaturní drátové spoje (nano-wires) nebo se mohou stát základem elektronických součástek, které umožní další miniaturizaci za hranice dnešní křemíkové technologie. Příkladem může být jednoelektronový tranzistor, na jehož vývoji pracují výzkumníci IBM. Jednostěnné a vícevrstvé nanotrubicice je možné úspěšně použít jako kanály tranzistorů řízených polem. CNT se tak stávají základem oboru označovaného jako nanoelektronika.

CNT vykazují i pozoruhodné mechanické vlastnosti. Youngův modul je větší než 1 TPa. Je to pevnost srovnatelná s diamantem. Pevnost v tahu je 200 GPa. Nanotrubicice jsou ideálním stavebním prvkem nanoelektromechanických systémů NEMS (NanoElectroMechanical Systems). S polohou nanotrubic je možné manipulovat, měnit jejich tvar, řezat je a umísťovat je mezi elektrody.

Tobias Hertel, Robert Walkup, Richard Martel a Phaedon Avouris ve Výzkumném centru Thomase J. Watsona firmy IBM objevili, že van der Waalovy síly (přitažlivé síly působící mezi atomy a molekulami) jsou schopny nanotrubicice udržet pevně na povrchu, na němž jsou umístěny. Navíc je možné měnit jejich rozmístění i orientaci, a také ohýbáním měnit jejich tvar. Po tom, co byly nanotrubicice různým způsobem zohýbány, jejich silná interakce s povrchem je udržela v tomto pokriveném tvaru. Pomocí ještě větších sil byli výzkumníci schopni nanotrubicice i řezat. Pro tento účel však bylo nezbytné ukotvit nanotrubicice k povrchu mnohem pevněji prostřednictvím chemických vazeb, namísto fyzikálních van der Waalových sil.

Tyto studie vedly k důležitému závěru, že nanotrubicice mají tendenci přizpůsobovat se tvaru povrchu, na němž se nacházejí. Vlastnosti takto tvarovaných nanotrubic se pak liší od vlastností perfektně přímých nanotrubic s dokonale kruhovým průřezem.

návrhem elektronických systémů, jak podpořit něco jiného než jen návrh tranzistorů a logických hradel, jak podpořit vývoj embedded softwaru a návrh čipů sdružujících analogové a digitální obvody (mixed

analog a digital) a verifikaci systémů, ta představuje totiž tu největší výzvu pro budoucnost. Typickým systémem v roce 2010 bude kombinace embedded hardwaru a softwaru, energeticky nezávislé (nonvo-

latile) paměti a logiky, vše na jednom čipu nebo v jediném čipovém systému. Musíme být proto schopni verifikovat více než pouhé logické obvody a paměť na čipu.

Máme mnoho oblastí návrhu, které dnes používají velké množství informací, a které bude možné v nejbližších pěti letech plně automatizovat. Jednou z takových oblastí jsou kabelážní systémy pro automobilový a letecký průmysl. Dnes používá většina automobilek svůj vlastní software pro návrh kabelových svazků, to však nebude již za pět let možné. Problém bude natolik složitý, že společnosti jako Mentor Graphics budou nabízet software, který umožní simulovat, co se stane, když stisknu brzdy pedál a současně budu ladit autorádio, problém, jak multiplexovat všechny signály. To, co představuje příležitost pro společnosti zabývající se návrhem je nový způsob návrhu.

### Jaké jsou budoucí trendy v technologii hradlových polí, signálových procesorů, součástek s analogovými i digitálními signály, desek plošných spojů?

To je množství trendů. Velmi zajímavá je oblast plošných spojů. Většina lidí ji považuje za nevyzrálejší a neočekává tedy, že by zde mohlo dojít k nějakým změnám. Ve skutečnosti však právě změny v oblasti desek plošných spojů budou velmi dramatické. Důvod je jednoduchý – miniaturizace. Je totiž levnější miniaturizovat desku plošného spoje než vyvíjet návrhová pravidla pro další miniaturizaci čipu. Vyvíjejí se proto nové postupy jak zvětšit počet vrstev desky plošného spoje, jak zmenšit vzdálenost mezi spoji na desce, jak analyzovat problémy rušení. Návrh desky plošného spoje je dnes mnohem složitější než před pěti lety. Rovněž v oblasti FPGA a DSP pokračuje vývoj směrem ke stále komplikovanějším a větším systémům, hradlová pole FPGA mají dnes integrovány embedded procesory, mají milióny hradel. Musíme tedy vyvíjet nástroje, které pomáhají navrhovat systémy na bázi FPGA přímo na desce plošných spojů a společně s návrhem této desky tak, aby byla zajištěna funkce celého systému a ne pouze FPGA jako samostatné součástky. A zde jsou právě jedinečné návrhové systémy firmy Mentor Graphics.

Co se týče signálových procesorů DSP, stále častěji zjišťujeme, že programovatelné procesory DSP jsou schopny obsloužit jen část požadovaných multimediálních aplikací pracujících v reálném čase. Stále více je třeba používat specializované obvody, harvardskou logiku, abychom dosáhli potřebného výkonu, jakož i programovatelné logické obvody pro realizaci obvodů umožňujících provádět specifické funkce digitálního zpracování signálů.

Porovnáváme-li to, co bylo před deseti lety s tím, co bude za pět let, návrháři bude

Alternativní metoda přípravy jednostěnných nanotrubic byla popsána skupinou vedenou Smalleyem v roce 1996. Používala odpařování grafitu laserovým impulzem a výsledkem byl velký výtěžek jednostěnných trubic s neobvykle jednotným průměrem. Tyto vysoce stejnoměrné trubice měly daleko větší tendenci vytvářet svazky než ty, které byly připraveny odpařováním v obloukovém výboji a Smalley je nazval provazcovými strukturami (ropes). První experimenty ukázaly, že tyto provazce obsahují velký podíl nanotrubic se specifickou strukturou odpovídající teoretickým předpokladům. Další práce sice ukázaly, že provazcové struktury mohou být i méně homogenní, nicméně jejich syntéza výrazně posílila výzkumné úsilí.

Pro výzkum nanotrubic byl dokonce použit i superpočítač Earth Simulator firmy Intel, jenž je považován za nejrychlejší na světě. Společnost Intel zpřístupnila tento superpočítač výzkumníkům zabývajícím se studiem vlastností CNT v září roku 2002. Výzkumníci studovali vlastnosti úseku nanotrubic délky 120 nanometrů tvořené 20 tisíci atomy uhlíku. Analýzu dat, která by normálně trvala několik měsíců, provedl superpočítač za jediný den.

### Perspektivy aplikací

V roce 1994 vyrobili Peter Harris, Edman Tsang a jejich kolegové poprvé jednostěnné uhlíkové kužely s morfologickými vlastnostmi podobnými čepičkám na konci nanotrubic. Byly připraveny vysokoteplotním zpracováním fullerenovými sazí. Skupina Sumio Iijimy následně ukázala, že tyto kužely je možné vyrobit rovněž laserovou ablací grafitu a nazvala je nanopištáky (nanohorns). Stejná skupina pak ukázala, že nanopištáky mají nápadné adsorpční a katalytické vlastnosti, a že je možné je využít jako součásti nové generace palivových článků.

Výzkumy rovněž ukázaly, že nanotrubice je možné otevřít a naplnit různými látkami, včetně biologických molekul, a vytvořit tak jakési nanozkumavky.

Technologie nanotrubic sehraje podle NKK Corporation v budoucnosti hlavní roli v televizní technice. Uhlíkové nanotrubice, jako válce tvořené uhlíkovými atomy, jsou velmi

účinnými vodiči a mohou při nízkých napětích emitovat obrovské množství elektronů. Ocelářská společnost NKK vyvinula uhlíkovou nanotrubicu ve tvaru pásky. Tyto pásky jsou ohebné a bude možné je použít v příští generaci plochých zobrazovačů, které nahradí plazmové displeje. Ke snížení výrobních nákladů přispívá i nová výrobní metoda, kterou

Tabulka 1 Přehled historie výzkumu CNT

1991 objev víceštěnných uhlíkových nanotrubic
1992 objevena vodivost nanotrubic
1993 syntéza jednostěnných nanotrubic
1995 objevena emise pólů u CNT
1996 vyrobeny provazce tvořené jednostěnnými nanotrubicemi
1997 studována kvantová vodivost uhlíkových nanotrubic
1997 naplnění nanotrubic vodíkem
2000 objevena tepelná vodivost nanotrubic
2001 integrace uhlíkových nanotrubic pro logické obvody
2001 objevena intrinsická supravodivost uhlíkových nanotrubic

rou NKK vyvinula a jež je schopna produkovat nanotrubice s téměř 100 % čistotou. Odpadá tak potřeba nákladného povýrobního čištění. Nanotrubice ve tvaru pásky je podle NKK možné využít nejen v plošných displejích příští generace, ale i v palivových článcích, displejích s emisí pólů (FE - Field Emission) a vyzařujících prvcích integrovaných obvodů.

Společnost Motorola dokonce oznámila, že je schopna na bázi technologie uhlíkových nanotrubic vyrobit 50palcový (úhlopříčka 127 cm, tloušťka 2,5 cm) displej, který je podstatně levnější než plazmové displeje. Motorola je v čele vývoje displejů využívajících uhlíkové nanotrubice pro emisi pólů. Podle informací společnosti iSuppli, která se zabývá průzkumem trhu, má firma Motorola k dispozici postup nanášení nanotrubic na substrát, s jehož pomocí bude možné realizovat TV přijímače s velkoplošnými displeji. Zpráva udává, že tato technologie tzv. nanoemisních displejů umísťuje uhlíkové nanotrubice kolmo na povrch substrátu. Svislé umístění nanotrubic umnožňuje funkci displejů při daleko nižších napětích, než vyžadují konkurenční technologie, a náklady jsou tak mnohem nižší než u plazmových displejů.

Společnost iSuppli však současně varuje, že jakkoliv je potenciál nové technologie CNT obrovský, může trvat 5 až 10 let, než bude možné spatřit její skutečnou aplikaci.

RNDr. Petr Beneš

mít k dispozici knihovnu s různými procesory a DSP, z níž bude moci vybírat, bude schopen sestavovat systémy jejich připojováním na sběrnice. Bude schopen simulovat celé systémy a ověřovat jejich funkci. Nebude muset nakupovat součástky a zapojovat je na desce plošných spojů.

### Je nějaká mez pro počet tranzistorů na jednom čipu?

Otázkou je spíše limit pro nákladově efektivní počet tranzistorů na čipu. Vždycky můžeme na čip umístit více tranzistorů, jsme-li ochotni zaplatit vyšší cenu. A jediným hlediskem je, zda přidání dalších tranzistorových funkcí ospravedlní toto zvýšení ceny. Existují určité aplikace, kde je levnější použít více čipů, nebo mít méně funkcí či zajistit tyto funkce jiným způsobem, nicméně počet tranzistorů na čipu bude vzrůstat. Nemůžeme se řídit Mooreovým zákonem, ale reálným vývojem (learning curve), kdy náklady na jednu tranzistorovou funkci budou neustále klesat.

### Jaké bitové rychlosti a hodinové frekvence můžeme v budoucnu očekávat?

Zvýšit rychlost sériového zpracování dat je vždy nejlepším způsobem jak zvýšit výpočetní výkon. Avšak tento výkon je dnes v převážné míře zvyšován paralelním pro-

váděním operací. Vyšší bitové rychlosti přináší problémy s rušením a interferencemi signálů při návrhu systémů. Takže bitové rychlosti budou vzrůstat a to neomezeně. Budeme samozřejmě schopni zpracovat světelné signály v oblasti terahertzů,

pokud to bude třeba a pokud to bude cenově dostupné. Jde spíše o to, co je z hlediska nákladů efektivnější pro zvýšení výkonu – paralelní zpracování, digitální zpracování světelných signálů, jiné způsoby přepínání (switching) signálů? Míra výkonu systémů však bude vzrůstat rychleji, než bitové rychlosti sériového zpracování dat, protože to je mnohem nákladnější.

### Jaký zcela nový typ elektronické součástky nebo systému budoucnost přinese?

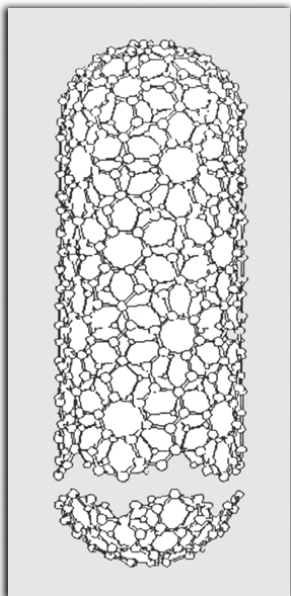
Skutečně revoluční vývoj vyžaduje dlouhý čas, než je možné jej realizovat ve výrobě. Příkladem mohou být dnes

často citované nanotechnologie a s tím související horké novinky jako carbon nanotubes (CNT) a nano wires, které mohou být s velkou pravděpodobností aplikovány v elektronických obvodech. Existují však již poměrně nové technologie, které jsou

zralé k rozsáhlému využití. V roce 1974 jsem pracoval v malé skupině, jež vyvíjela prvky s deformovatelnými mikrozrcadly, které dnes společnost Texas Instruments (TI) označuje zkratkou DLP (Digital Light Processor). Trvalo dvacet let než bylo možné tento prvek vyrobit. Přestože v laboratoři jsme jej měli již v roce 1974, teprve v roce 1994 byl uveden na trh. A dnes prodává TI těchto procesorů DLP za miliardy dolarů pro projekční televize. Součástí obsahuje pole miliónů mikrozrcadel, jejich úhel natočení je možné měnit napětím. Tato technologie, jak vyzrává, může být použita například pro připojování světelných signálů, pro tisk, pro již zmíněné projekční televizory.

Mnohdy máme k dispozici novou technologii, ale stále jsme daleko od aplikací, které jsou v ní obsaženy. Pro mnoho novinek, které budou jednou dostupné již existují technologie, ale potřebujeme čas, abychom je dokázali z hlediska nákladů efektivně realizovat v dostatečně velkých výrobních sériích. Některé z nich jsou zajímavější než jiné, protože jsou předvídatelné. Takovým příkladem mohou být již zmíněné carbon nanotubes (10 000 krát tenčí než lidský vlas). Avšak dosud neznáme jejich budoucí aplikace, víme jak je využít ve stávajících aplikacích, což není zdaleka tak vzrušující jako to, co přinese budoucnost.

RNDr. Petr Beneš,  
rozhovor vznikl za podpory společnosti ASICentrum  
odpovědi Waldena C. Rhinese  
zaznamenal Ing. Martin Vach



Struktura uhlíkové nanotrubičky CNT