

TRENDY VE SVĚTĚ POLOVODIČOVÝCH TECHNOLOGIÍ

Vladislav Musil

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav mikroelektroniky, Údolní 53, Brno, musil@feec.vutbr.cz

1. Úvod

Polovodičová technika (mikroelektronika) je již po pět desetiletí vedoucí oblastí elektroniky. Je spojena s vytvářením elektronických zařízení malých rozměrů (integrovaných obvodů) s velkou funkční schopností, vysokou spolehlivostí, malou spotřebou energie a nízkou cenou. Na jejím vzniku a vývoji se výrazně projevilo a projevuje úsilí po zmenšování rozměrů, hmotnosti a spotřebovaného výkonu (ruku v ruce s digitalizací elektronických systémů) a sám rychlý rozvoj mikroelektroniky je výsledkem rovnováhy mezi rozhodujícími faktory technologického a materiálového výzkumu, vývoje elektronických systémů, vývoje jejich aplikací a souvisejícími aktuálními ekonomickými aspekty.

Rostoucí integrace systémů v mikroelektronice je klíčem k realizaci moderních výrobků a současně zdrojem potřebných inovací. Trvalý tlak na další miniaturizaci mikroelektronických součástek umožňuje vznik nových technologických postupů, zejména v oblasti výroby a montáže.

2. Trendy současných polovodičových technologií

Bez moderních technologií výroby, řady nových materiálů a pokročilé litografie by byl další pokrok v oblasti integrovaných obvodů zcela nemyslitelný, integrované obvody svými rozměry dostávají do oblasti nanostruktur a technologie do oblasti nanotechnologií. Aktuální trendy současných polovodičových technologií se týkají

- a) vlastních integrovaných struktur a jejich zmenšování (nanostruktury)
- b) technologických procesů a příslušných technologických zařízení
- c) návrhu integrovaných obvodů a jejich testování
- d) ekonomie a spolehlivosti výroby

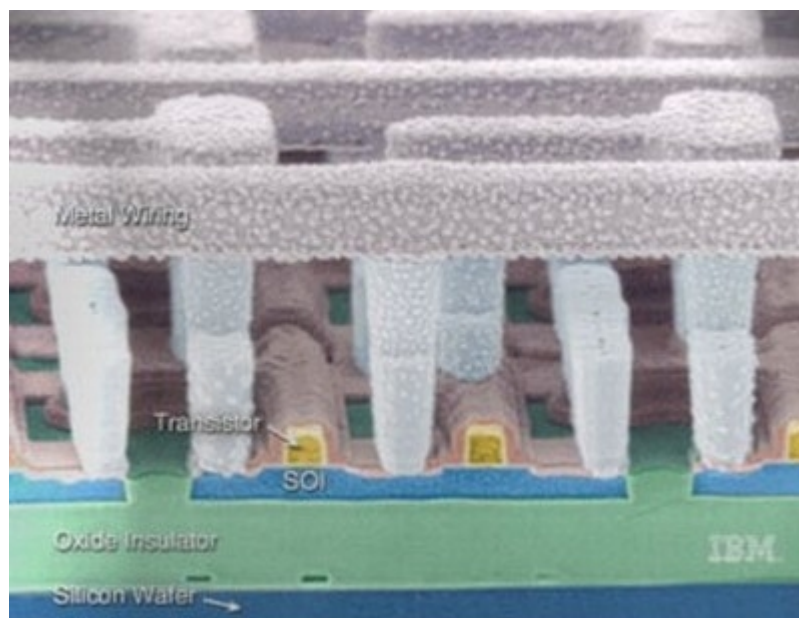
V oblasti technologií a materiálů nastupují následující trendy:

a) Měděné spoje. Již několik let se u nejsložitějších obvodů přechází od hliníkových spojů k měděným (např. Intel nahradil hliník mědí při přechodu na 130 nm výrobní technologii). Měď má kromě lepší vodivosti také schopnost tvořit užší spoje, a tím pádem fakticky umožňuje další miniaturizaci struktur. Mezi další výhody měděných spojů patří nižší ztrátové teplo, vyšší kmitočet přenášeného signálu a menší zpoždění signálů na spojích. Nevýhodou je komplikovaná technologie s několika mezivrstvami, aby se atomy mědi nedostaly do aktivních oblastí křemíku.

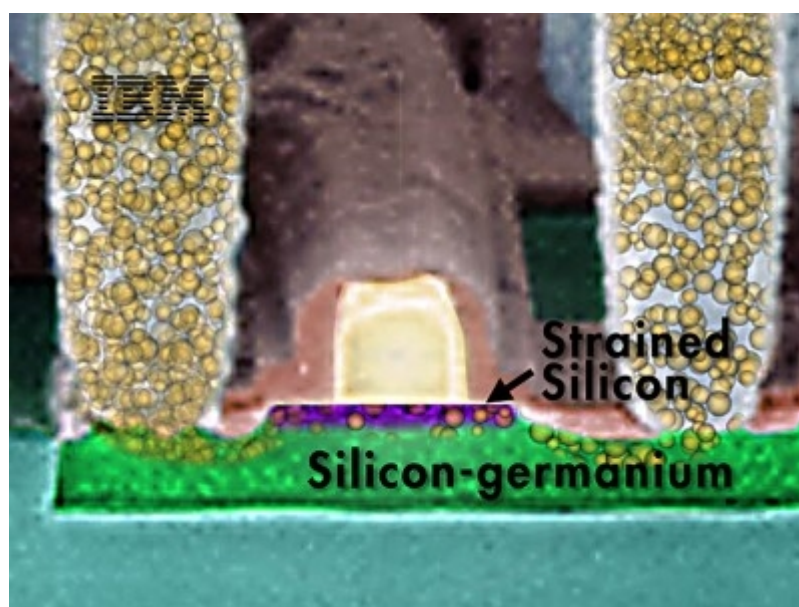
b) Nová dielektrika s větší (high-k) a menší (low-k) dielektrickou konstantou (než běžně používaný používaný oxid křemičitý SiO_2 , který má dielektrickou konstantu $k = 3,9$). Low-k materiálů je celá řada, vybrat bylo nutné zejména s ohledem na prodloužení životnosti v současnosti používané technologie depozice z plynné fáze (CVD, Chemical Vapor Deposition). Např. u procesoru AMD64 (kanál 130 nm) bylo oxid křemičitý (dotovaný fluorem, FTEOS s $k = 3,6$) nahrazen vrstvou SiCOH s $k = 2,8$. Kombinace Low-k dielektrika a měděných spojů zmenšuje časovou konstantu RC a následně redukuje zpoždění (u zmíněného AMD64 se uvádí redukci zpoždění o 15-20%).

Materiál high-k nahrazuje hradlový oxid, poprvé použil Intel v technologii 45 nm, kde šlo o oxidy hafnia. Důvodem je jednak větší homogenita nových materiálů a jednak větší dielektrická konstanta má za následek lepší vlastnosti (větší transkonduktanci).

c) **Technologie SOI** (Silicon On Insulator), tj. „křemík na izolantu“. Používá hlavně firma IBM (např. pro IBM PC od 1999) a AMD. Princip SOI je poměrně jednoduchý – aktivní struktury (tranzistory) se od samotného substrátu (zbytku waferu) oddělí vrstvou izolantu, například oxidem křemičitým SiO_2 , na které je opět superčistá vrstvička křemíku. Sníží se tak parazitní jevy, svody proudu a čas nabíjení. Tranzistor je schopen dosáhnout rychlejšího přepínání, což se také pozitivně promítne na samotném dosažitelném kmitočtu procesoru. Nižší energie nutná ke spínání tranzistorů v technologii SOI zároveň snižuje spotřebu čipu - pro 90 nm výrobní proces se uvádí snížení až o 46% v případě statické spotřeby a snížení až o 38% v případě dynamické spotřeby (údaje firmy AMD). Užívá se na procesory i paměti. Nevýhodou SOI waferů je jejich vyšší cena, a to kvůli jejich náročnější výrobě (více operací).



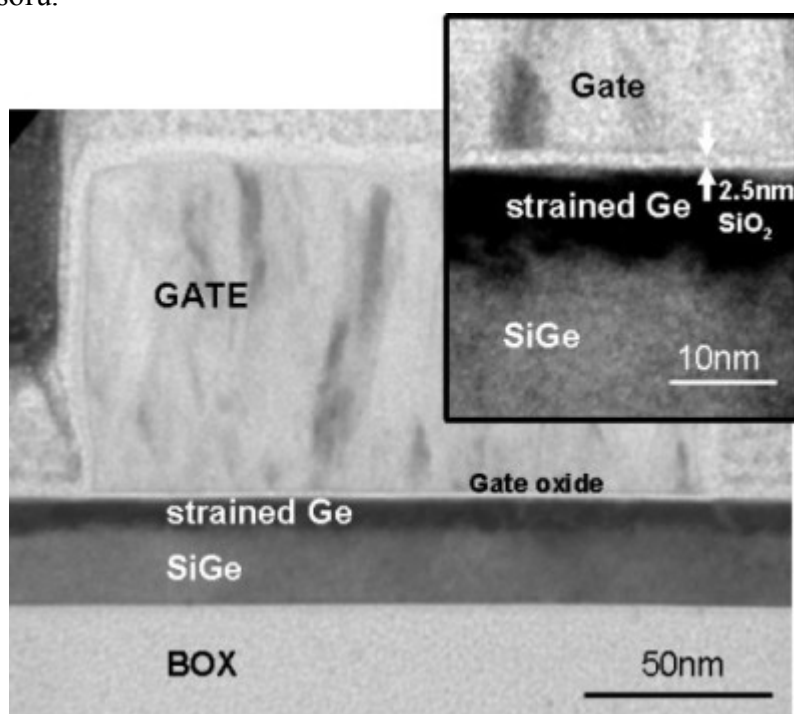
Obr. 1. Animace technologie SOI (podle www.ibm.com)



Obr. 2. Technologie předpjatého křemíku (podle www.ibm.com)

d) Technologie předpjatého křemíku (Strained Silicon, napnutý křemík) se používá běžně pro procesory (Intel i AMD), kde umožňuje významné zvýšení pracovních kmitočtů (pro paměti se používá méně). Technologie předpjatého křemíku je založena na napnutí vrstvičky křemíku v oblasti kanálu dotací substrátu germaniem (SiGe). Díky větším mezerám mezi atomy takto navázaného křemíku mají elektrony větší pohyblivost ve směru kanálu (až o 70-80%). Rychlost se zvýší až o 35% a v případě tzv. Dual Stress Lines až o 40% (u 65 nm výrobní technologie).

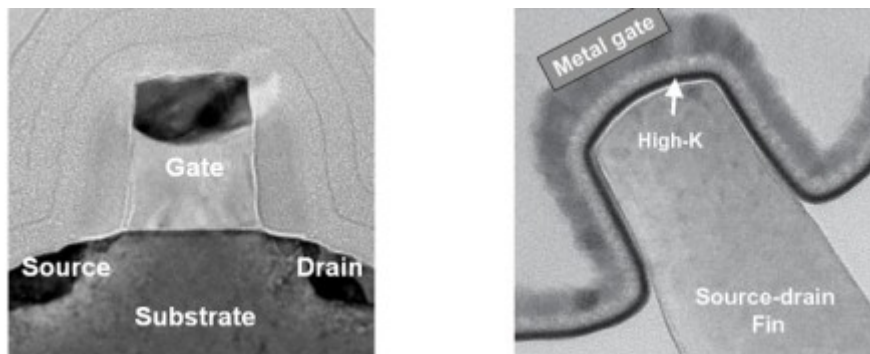
e) Technologie předpjatého germania (Strained Germanium) je obdobná předchozí technologii. V případě podkladu křemík-germanium a naneseného germania je mřížka naopak mírně stlačená. Pohyblivost elektronů a děr je ovšem u germania zhruba 3x vyšší než v případě křemíku. Problémem je podstatně horší rozsah pracovních teplot germania a také samotné zpracování, které nutně musí vycházet z používaných technologií výroby. S nasazením se počítá až od 32 nm výrobní technologie a IBM předpokládá řádové zvýšení rychlosti procesoru.



Obr. 3. Technologie předpjatého germania (podle www.ibm.com)

f) Kovové hradlo (Metal gate) nahrazuje současné používané z polykrystalického křemíku (poly-Si). Jsou zvládnuty silicid niklu NiSi nebo titanid niklu NiTi. Rychlost tranzistoru díky technologii kovových hradel má být podle AMD vyšší o 20-25%.

g) Tranzistory s více hardly (Multi-Gate transistors) se očekávají s nástupem technologie 32 nm. Díky širšímu kanálu (v porovnání s typickým tranzistorem) dosahuje tento tranzistor lepších vlastností (rychlost, transkonduktance a svody). Podle údajů firmy Intel tranzistor podle obr. 4 v technologii 65 nm vykazoval zvýšení výkonu (agregovaný ukazatel) až o 45% a proud tranzistoru ve vypnutém stavu se snížil 50x oproti typickému tranzistoru (také díky high-k dielektriku).

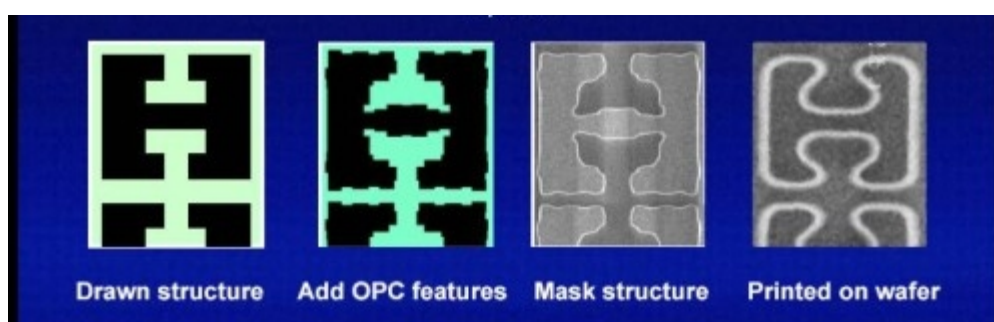


Obr. 4. Tranzistorové struktury firmy Intel: klasický (jednohradlový) a tříhradlový tranzistor (podle www.intel.com)

h) Změny v oblasti fotolitografie

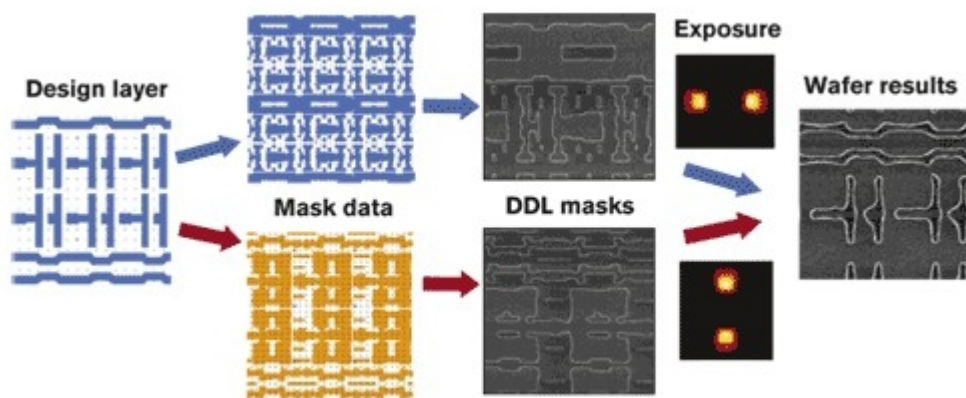
Se zmenšující se výrobní technologií se řada změn odehrála i na poli fotolitografie. V současnosti se při výrobě procesorů běžně používá vlnové délky 193 nm z excimerových laserů – DUV (Deep UltraViolet) fotolitografie. Dříve očekávaný přechod na záření 157 nm se asi nebude konat a výrobci přejdou přímo na EUV (EUV litografie - (Extreme UltraViolet - používání ultrafialového světla s extrémně krátkou vlnovou délkou, předpokládá se 13,5 nm, v dlouhodobějším horizontu).

Protože vlnová délka již dávno „podkročila“ hranice velikosti výrobní technologie a „velikost“ vzorů, které se pomocí této vlnové délky tvoří, je následkem řada deformací oproti (vzorům a rozměrům) na fotolitografické masce. Proto je dnes nutné používat řadu korekčních technik, především **Optical Proximity Correction** (korekce jevů blízkosti – laterální expozice), která je založená na (obvykle programové) úpravě fotolitografické masky takovým způsobem, aby část, která bude námi cíleně ozářena, měla přesně požadovaný tvar. Díky řadě optimalizací masky se minimalizuje zkreslení a potlačují nedostatky současné DUV fotolitografie (viz obr. 5).



Obr. 5. Optical Proximity Correction (podle www.intel.com)

Technika fázového kontrastu (Phase Shift Mask) Využívá interference a změny fáze k zlepšení kontrastu a umožňuje zvýšit rozlišovací schopnost fotolitografie DUV. **Metoda dvojí (dvojitě) expozice** (Double Exposure) je založena na efektu dvojitého osvětlení waferu (bohužel vyžaduje dodatečné masky).



Obr. 6. Metoda dvojité expozice (podle www.intel.com)

Dalším z kroků k prodloužení života DUV fotolitografie s vlnovou délkou 193 nm je **imerzní fotolitografie**, která je založena na optických vlastnostech waferu pokrytého tenkou vrstvou vody nebo jiné vhodné kapaliny s požadovanými vlastnostmi.

Klíčovou oblastí jsou v současné době **fotorezisty**, které fundamentálně limitují možnost dalšího zmenšování struktur, a do této oblasti jsou dávány velké prostředky.

i) Přechod na wafery 450 mm. Ke změně velikosti waferů dochází v polovodičovém průmyslu zhruba každých 12 až 15 let. Tento trend ovšem není nadále udržitelný (z finančních a technologických důvodů), předpokládá se zpomalení. Podíl čipů na 300 mm waferech je dnes celosvětově přibližně 25%. Počátek přechodu k 450 mm waferům Intel plánuje k výrobní technologii 22 nm, pro kterou se také předpokládá nasazení EUV litografie.

j) Ekonomické hledisko. Na nově zaváděné technologie a materiály je kromě potřebných parametrů (stálost při procesních teplotách a potřebné materiálové vlastnosti, kladen zejména požadavek nízké ceny a možnost nasazení se současnými výrobními technologiemi. Už jen z finančních důvodů není možné pro nový „vhodný“ materiál měnit stávající výrobní postupy (technologický konzervativismus) a takové technologie zatím nemají velkou šanci se komerčně prosadit, zejména pokud bude existovat jiná varianta/alternativa udržující potřebný pokrok ve výrobě a dostatečnou konkurenceschopnost.

k) Použití memristorů jako paměťových prvků pamětí SRAM.

l) Tranzistory s křemíkovými nanotubicemi - technologie, která by v horizontu 20 let mohla být komerčně nasazena (podle optimistických předpokladů).

3. Některé společenské souvislosti technického pokroku

Měřítkem technologické úrovně jsou **paměti DRAM** a **paměti FLASH**. Dosahuje se u nich největší hustoty integrace. Často jsou označovány jako „hnací motor mikroelektroniky“. V posledních letech se zvyšovala kapacita pamětí RAM čtyřnásobně přibližně každé tři roky (v literatuře se hovoří o tzv. **Moorově zákoně**, Moore's Law):

Složitost čipů	- index růstu 4 x za 3 roky
Minimální rozměr struktury	- index růstu 0,5 x za 3 roky
Plocha čipu	- index růstu 2 x za 6 roků

Význam Moorova zákona je velký, často je vnímán jako barometr polovodičového průmyslu, měřítko pro hodnocení inovace a pokroku. Především jde o výrok, který je srozumitelný i lidem, kteří nejsou odborníci v mikroelektronice. Moorův zákon podnítl vznik několika

doplňků, z nichž velmi názorný je tzv. **Rockův zákon** (někdy označován jako druhý Moorův zákon): **Investice do nových zařízení na výrobu čipů se zdvojnásobuje každé 4 roky.** Tento zákon překvapivě dobře platí a má zásadní význam pro ekonomiku polovodičového průmyslu.

Metcalfeův zákon (Metcalfe's Law) odpovídá na otázku vztahu technologií a jejich uživatelů. Zakladatel firmy 3Com Robert Metcalfe si všiml, že nové technologie získávají na hodnotě pouze, pokud je používá mnoho spotřebitelů. Definoval to takto: „**Míra užitečnosti dané technologie se rovná čtverci počtu uživatelů.**“

Čím více uživatelů získá určitý software, síť, standard nebo třeba kniha, tím větší hodnotu získává. Tím více nových uživatelů bude mít zájem, tím více hodnoty bude technologie přinášet a tím rychlejší bude její adaptace. Kdyby byl telefon majetkem pouze dvou lidí na světě, mohli by volat pouze jeden druhému, a hodnota této technologie by tak nebyla velká. V současnosti je však telefon přístupný naprosté většině populace v naší společnosti a jeho užitečnost je tedy nekonečně větší.

Příkladem může být Internet, který existoval po mnoho let, ale kritické masy dosáhl až v roce 1993. Od té doby je jeho růst vskutku exponenciální. Teprve od té doby se datuje jeho popularita a příliv podnikatelských investic (Mirovský).

Zákon rozvratu (Law of Disruption). Pokrokem vědy a techniky dochází ke vzniku a zvětšování mezery mezi technologickým vývojem a vývojem společnosti, ekonomiky a politického systému. Tento proces lze jednoduše definovat jako zákon rozvratu: „**Zatímco společenský, politický a ekonomický systém se mění lineárně, technologie se mění exponenciální rychlostí**“ (Mirovský).

4. Závěr.

Návrh a výroba integrovaných obvodů bude stále složitější. Současné a připravované technologie představují řadu alternativ a řešení ještě na řadu let. Díky stálému růstu trhu informačních technologií a růstu trhu s polovodičovými součástkami se máme v příštích letech na co těšit. Sledovat řešení stále složitějších problémů v oblasti technologie výroby bude jistě stále zajímavější.

V současnosti je reálná vyhlídka na zhruba 15 let pokračování dosavadního trendu polovodičových technologií. Velmi zajímavá je používaná fyzika a chemie. Objevují se mimořádné aplikace. Potvrzuje se vize Richarda Feynmana: „Tam dole je hodně místa“.

Literatura

Waser, R. (editor): Nanoelectronics and information technology. Wiley-VCH (2003), ISBN 3-527-40363-9.

Luryi, S. - Xu, J. - Zaslavsky, A.: Future trends in microelectronics. The road ahead. Wiley (1999), ISBN 0-471-32183-4.

Luryi, S. - Xu, J. - Zaslavsky, A.: Future trends in microelectronics. The nano millenium. Wiley (2002), ISBN 0-471-21247-4.

<http://public.itrs.net>, The International Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose.

<http://www.intel.com>

<http://www.ibm.com>

<http://www.isi.edu/mosis/>

<http://www.sematech.org/public/about.htm/>

<http://www.te.ri.ac.uk/europractice/>

<http://tima-cmp.imag.fr/>

<http://www.pcmp.caltech.edu/>

<http://nano.xerox.com/nano/>

<http://www.icsi.berkeley.edu/>

Série článků Lukáše Petříčka:

http://www.svethardware.cz/art_doc-0153C5141A320803C12571EF003F6BAF.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-5B411DA7F9D60629C12571EF00432466.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-78830B7B72554177C12571EF00445C38.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-D04B232296C20BA2C12571EF00461BB9.html

MIROVSKÝ, J.: Zákonitosti vývoje informačních a komunikačních technologií.

http://mirovsky.com/text%5CSbornik_VSE_F3_ZS2001.doc

KULHÁNEK, P.: Memristor – čtvrtá pasivní elektronická součástka.

http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02_mem.php

OSTER, G.F.: The Memristor: A New Bond Graph Element; Transactions of the ASME (1972) 1–4. Je na http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02/Oster.pdf

TOUR, J.M. - HE, T.: The fourth element; Nature 453 (2008) 42–43. Je na http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02/Tour.pdf

<http://www.roznovskastredni.cz/biolek/index.php>. Zdařilý web se základními informacemi o memristorech

<http://www.nanotechnologie.cz> nebo <http://www.nanoklastr.cz>: dobré poučení o nanotechnologiích.