

PERSPEKTIVNÍ POLOVODIČOVÉ STRUKTURY A SOUČÁSTKY

Vladislav Musil

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav mikroelektroniky, Technická 10, Brno

musil@feec.vutbr.cz

Anotace:

Obsahem příspěvku je stručné shrnutí některých směrů rozvoje polovodičových nanostruktur a jejich možných aplikací. Jde o tenkovrstvé struktury, heterostruktury, samoorganizované nanostruktury a kvantové tečky.

1. Úvod

Polovodičová technika (mikroelektronika) je již po pět desetiletí vedoucí oblastí elektroniky, integrované obvody se 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), především měděné spoje, nová dielektrika s větší (high-k) a menší (low-k) dielektrickou konstantou, technologie SOI (Silicon On Insulator), technologie předpjatého křemíku (Strained Silicon, napnutý křemík), kovové hradlo (Metal gate), tranzistory s více hradly (Multi-Gate transistors),

b) technologických procesů a příslušných technologických zařízení, především vývoj v oblasti fotolitografie (kde vývoj rezistů představuje hlavní slabinu současné nanoelektroniky),

c) návrhu integrovaných obvodů a jejich testování,

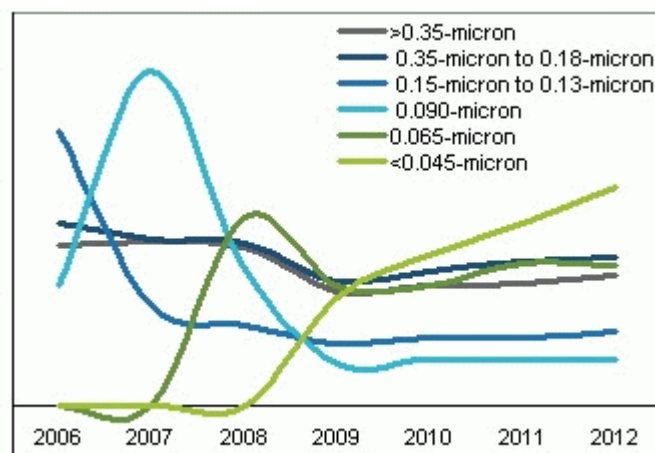
d) ekonomie a spolehlivosti výroby,

e) výzkumu a návrhu nových struktur.

2. Životní cyklus technologie a 3D integrace

Finanční nákladnost nových technologií vede k prodlužování životního cyklu polovodičových technologií, ke snaze využít technickou životnost výrobních linek (na rozdíl od dříve dominantní snahy co nejdříve přejít na novou technologii, na struktury s kratší délkou kanálu). Technologie 90 nm se prudce rozvinula a po dvou třech letech byla nahrazena technologií

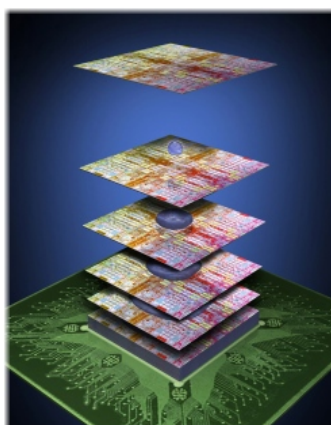
65 nm, která ustupuje pozvolna, a nová technologie 45 nm zde bude ve výrobě ještě dlouho.



Obr. 1 Křivky znázorňující životní cyklus polovodičových technologií

Zdroj: iSupply Corporation

Výrobci se snaží jako alternativu k dalšímu zmenšování rozměru struktur využít 3D integrace. Klíčovým problémem je chlazení, kde se laboratorně rozpracovává např. metoda s poetickým názvem *chladiče na bázi iontového větru*. Ionizovaný vzduch proudí v elektrickém poli mikrokanálky a odvádí ztrátové teplo [12]



Obr. 2 Princip 3D integrace

Zdroj: firma IBM

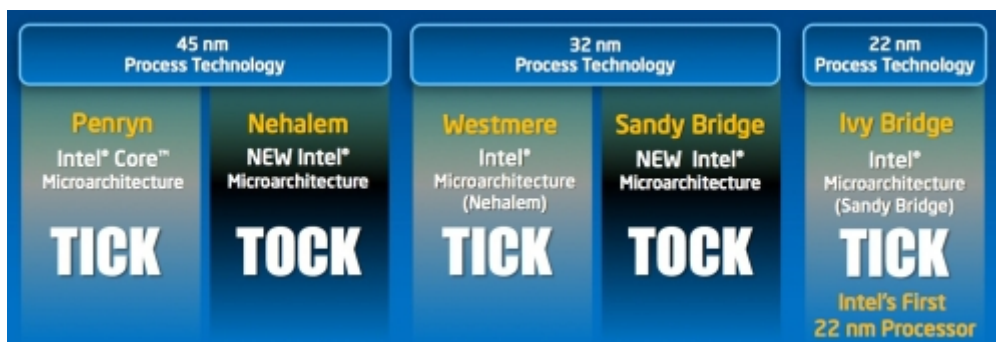
3. Technologie pro mikroprocesory a paměti

Ve výrobě mikroprocesorů a pamětí jsou hlavními hráči firmy Intel, AMD, Samsung, Global Foundries a TSMC. Pozorujeme přechod z technologie 45 nm na 32 nm, v nejbližší budoucnosti na 22 nm a ve výhledu na 14 nm a snad i 10 nm.

Poznámka k udávání rozměrů v technologiích. Až do konce 90. let bylo zvykem nazývat výrobní proces podle rozměrů nejmenší části tranzistoru, což byla délka hradla. Později se však z různých (hlavně marketingových) důvodů toto číslo začalo vzdalovat skutečnému rozměru hradla. Výrobci pamětí, kteří chtěli ve značení výrobního procesu odrazit jeho vypslost, značí výrobní proces jiným číslem; které odpovídá polovině vzdálenosti mezi kovovými spoji, tzv. „half-pitch“ nebo „technology node“. Původně byl rozměr half-pitch zvolen právě proto, že v rámci daného procesu odpovídal délce hradla.

Intel Technology Roadmap					
rozměr	45 nm	32 nm	22 nm	14 nm	10 nm
první výroba	2007	2009	2011	2013	2015

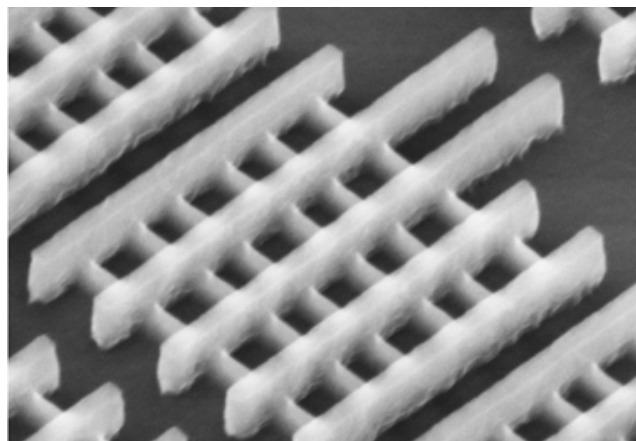
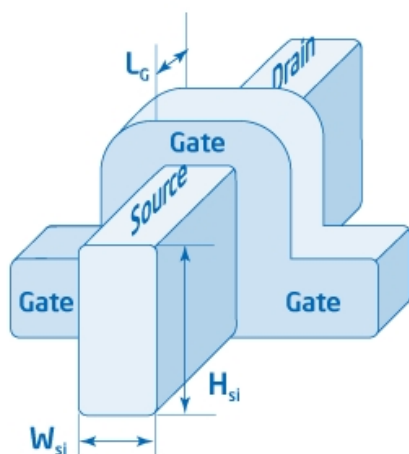
Nové procesory fy Intel		
označení	Sandy Bridge	Ivy Bridge
výrobní proces	32 nm	22 nm
typ tranzistoru	2D (planární)	3D (Tri-gate)



Obr. 3. Vývoj procesorů firmy Intel - odpovídá zavedenímu procesu "Tick-Tock," kterým se řídí inovace procesorů společnosti Intel. V první fázi přijde změna výrobního procesu, tedy tzv. Tick, ve druhé fázi pak přechod na novou architekturu, tedy tzv. Tock. Přechod na 22 nm výrobní proces (Tick) tedy bude v dalším období (dva roky?) následován přechodem na novou architekturu (Tock).

Zdroj: materiály společnosti Intel, www.bunnypeople.com

V souvislosti s nástupem technologie 22 nm očekáváme přechod na wafery 450 mm. Továrna na výrobu čipů na 450milimetrových waferech vyjde zhruba na trojnásobek ceny současných továren, což je zásadní ekonomický problém návratnosti investice.



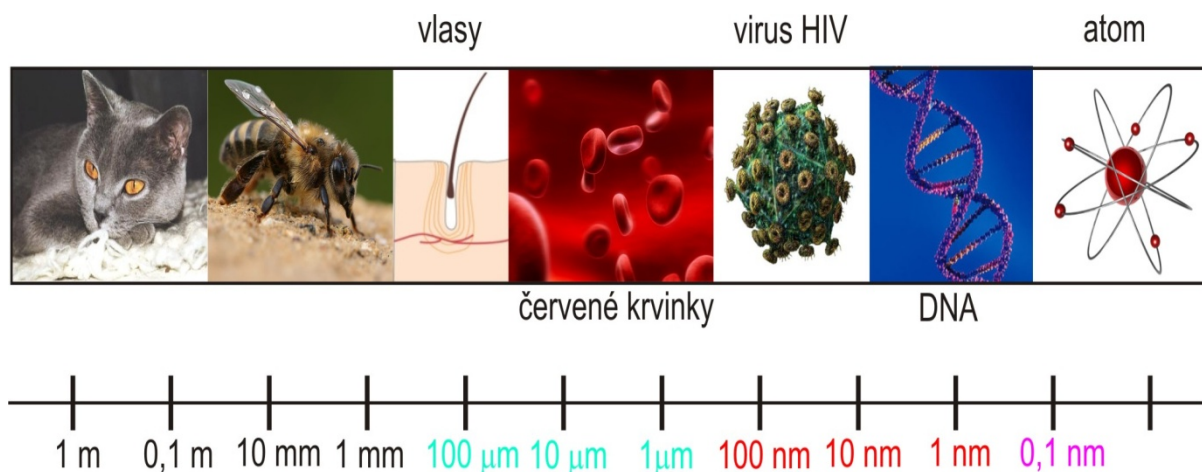
Obr. 4 Struktura CMOS Tri-Gate na procesu Intel 22 nm

Zdroj: Materiály společnosti Intel, www.bunnypeople.com

Thajwanská firma Global Foundries vyvíjí 20nm proces, který využívá výrobního postupu zvaného double-patterning (DTP), kde není třeba nových zařízení pro litografii. Technologie spočívá ve dvou krocích, nejprve se vytvoří větší struktury a ty jsou při druhém kroku vyplněné strukturami menšími.

4. Nanostruktury a nanotechnologie, heterostruktury a kvantové tečky

Nanotechnologie je poměrně nové slovo, ale není to úplně nová oblast. V přírodě většina základních životních procesů probíhá v nanorozměrech. Lidský vlas má průměr 0,1 až 0,2 mm, tedy 100 až 200 μm , hrubší částice prachu 20 μm , buňky červených krvinek jsou velké přibližně 5 μm , tloušťka jednotlivých vláken asbestu nepřesahuje 3 μm , jemné částice sazí nebývají větší než 2 μm , velikost většiny bakterií je asi 1 μm , virů okolo 100 nm, barevná vrstva oleje na kaluži je silná přibližně 50 nm, takzvané kvantové tečky jsou velké 2 až 20 nm, rozměr molekuly DNA se pohybuje v rozmezí 3 až 12 nm, průměr molekuly fullerenu C60 činí právě 1 nm.



Obr. 5 Rozměry objektů kolem nás

Koncem šedesátých let minulého století byla předpovězena možnost manipulovat s atomy a molekulami. Termín **nanotechnologie** jako první použil v roce 1974 Taniguchi [13]. Výzkumné práce se orientovaly na poznání způsobů, jak konstruuje struktury příroda a jak se chovají biologické entity o rozměrech na úrovni molekul. Průlomovou událostí bylo vynalezení nových přístrojů umožňující nejen pozorování, ale i manipulaci s jednotlivými atomy a molekulami (rastrovací tunelový mikroskop, mikroskop atomárních sil). Strojaři započali obrábět povrchy s nanometrickou přesností a výroba čipů velké integrace přesáhla rozměr 100 nm. Možnosti využití vlastností stavebních prvků a zařízení o rozměrech nanometrů byly rozpoznány i biology a začal výzkum jejich aplikace v medicíně, farmacii a biotechnologiích.

Při charakterizaci nanostruktur používáme tři následující kritéria: 1) mají alespoň jeden rozměr přibližně v intervalu 1 – 100 nm, 2) umožňují přímé ovlivňování fyzikálních a chemických vlastností struktur molekulárních rozměrů, 3) mohou být kombinovány tak, aby vytvářely větší struktury (zejména ovlivňováním samovolného růstu).

V současné době využíváme při výrobě elektronických součástek převážně litografické metody. Pozvolna se rozvíjí i nelitografické metody. Nelitografické metody jsou levnější, protože se využívá fenoménu samouspořádání. Klasickým příkladem je řízený růst polovodičových vláken metodou VLS (Vapour Liquid Solid) na katalytických částicích. V jednorozměrných polovodičových nanovlákních (nanodrácích) se silně uplatňují kvantové jevy, hovoříme o kvantových drácích (Quantum Wires, QW). Předpokládá se použití pro polem řízené tranzistory a pro tvorbu propojovací sítě.

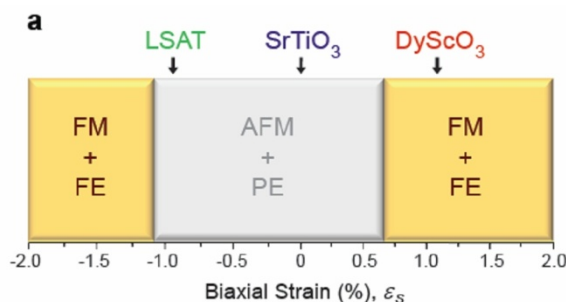
Lze realizovat také polovodičové nanostruktury s nulovými rozměry, takzvané kvantové tečky (Quantum Dots, QD). Jedná se o ohraničené nanometrové oblasti polovodiče (s úzkou šířkou zakázaného pásu) zabudované v objemu polovodiče se širším zakázaným pásmem.

Významné místo v polovodičových strukturách mají v současné době tzv. **heterostruktury**, založené na propojení různých polovodičových materiálů s podobnou mřížkovou konstantnou. Extrapolace procesu vytváření heterostruktur vede k možnosti "uvěznění" elektronů do velmi malých (nanometrových) oblastí, zmíněných kvantových teček.

Snižování dimenzionality se projevuje zejména (a to významně) v nárůstu počtu elektronových stavů s nejmenší energií, které jsou k dispozici pro zářivou rekombinaci, tedy i k zesílení schopnosti vyzařování. Velká účinnost konverze elektrické energie na světelnou je hlavním důvodem masivního využití heterostruktur v laserech (kvantové tečky jsou umístěny do aktivní oblasti laseru). Ve fyzikálních rozborech zjistíme, že v kvantových tečkách jsou pak všechny stavy soustředěny do diskrétních hodnot energií. Toto velmi připomíná energiové spektrum atomů, o kvantových tečkách se proto také někdy mluví jako o umělých atomech.

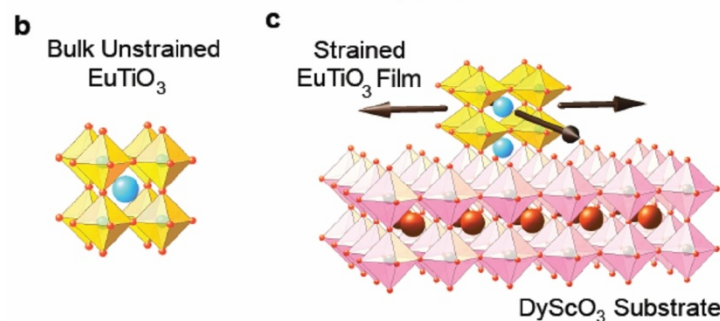
Spinotronika. První výsledky se objevují ve spinotronice (magnetoelektronice), které se předpovídá velká budoucnost. Jde o technologii využívající kvantové vlastnosti spinu elektronu. Zatímco v klasické elektronice je nositelem informace elektrický proud, resp. tok elektronů, ve spinotronice se kromě náboje elektronu uvažuje i orientace jeho spinu. Hlavním dosavadním výsledkem spinotroniky je tzv. jev obří magnetorezistence. Klasickou magnetorezistenci (závislost elektrického odporu na vnějším magnetickém poli - pokud má vodič magnetické vlastnosti, může směr vnějšího magnetického pole ovlivnit jeho elektrický odpor) objevil William Thomson (lord Kelvin) v roce 1856. Tehdy šlo však jen o několikaprocentní hodnotu celkového odporu vodiče.

Jev obří magnetorezistance (GMR, Giant Magnetoresistance) nastává v mnohovrstvých tenkovrstvých strukturách (vlastně nanostruktura v jednom rozměru – v tloušťce vrstvy). Elektrický odpor látky je ovlivněn interakcí spinu elektronu s magnetickým polem. Toho lze využít například ke čtení informace zapsané na harddisku. První čtecí hlava založená na tomto principu byla vyrobena v roce 1997 (firma IBM). Objev sám je z roku 1988. Objev tohoto jevu byl velkým překvapením. Většina fyziků nevěřila, že podobný jev je fyzikálně možný.



Obr. 6 Vliv mechanického napětí od podložky na EuTiO_3 [15]

Hlavním odborníkem na spinotroniku v ČR je Tomáš Jungwirth, jeden z nejcitovanějších českých vědců, pracovník FU AV ČR a University of Nottingham. Získal prestižní Grant pro pokročilé vědecké pracovníky od Evropské výzkumné rady (ERC), jež podporuje významné vědce a jejich projekty v oblasti hraničního výzkumu. Jde o první tzv. Advanced grant, který byl udělen českému žadateli na projekt z oblasti věd o neživé přírodě. Pětiletý grant je spojen s částkou 2,5 milionu EUR.



Obr. 7 Znáznornění tenkovrstvé struktury EuTiO_3 na substrátu DyScO_3 [15]

Jako příklad výzkumu ve spintronice uvedeme, že ve Fyzikálním ústavu AV ČR byl ověřen vliv dvouosého mechanického napětí od podložky na vlastnosti EuTiO_3 . Záporné (kompresní) i kladné (tenzální) mechanické napětí by mělo indukovat feromagnetickou (FM) a ferroelektrickou (FE) fázi v původně antiferomagnetickém (AFM) a paraelektrickém (PE) EuTiO_3 . Prakticky byly studovány vrstvy na třech podložkách: LSAT (tj. $(\text{LaAlO}_3)_{0.29}(\text{SrAl}_{1/2}\text{Ta}_{1/2}\text{O}_3)_{0.71}$), SrTiO_3 a DyScO_3 . Pouze na podložce DyScO_3 byla pozorována FM a FE fáze. Nevýhodou je, že jev byl prozatím pozorován jen při velmi nízkých teplotách.

Tenkovrstvé materiály tedy mohou mít vlivem mechanického napětí od podložky kompletně jiné vlastnosti než objemové materiály. V současné době vědci pracují na dalších tenkovrstvých materiálech, jež by měly mít požadované vlastnosti (tj. magnetické vlastnosti ovládané elektrickým polem) při běžných teplotách.

5. Závěr

V současnosti je reálná vyhlídka na zhruba 15 let pokračování dosavadního trendu polovodičových technologií. Jako velmi perspektivní vidíme použití nanotechnologií v elektronice. Velkou výzvou jsou nové směry jako spintronika, molekulární a biomolekulární elektronika a fotonika. Sestavování struktur na atomové a molekulární úrovni může vést k významnému zlepšení vlastností a funkcí materiálů a může zlepšit výkonnost konečných produktů. Nanotechnologie zaujala vědce, inženýry a ekonomy v celém světě nejen generickou explozí objevů v nanorozměrech, ale i pro její potenciální sociální dopady, především v internacionalizaci a globalizaci výzkumu a výroby.

Díky stálému růstu trhu informačních technologií a růstu trhu s polovodičovými součástkami se máme v příštích letech na co těšit. Z minulých zkušeností průmyslu polovodičů vyplývá, že vynálezy jednotlivých výrobitelných a spolehlivých zařízení neuvolňují okamžitě sílu skrytou v nové technologii. To se stane v okamžiku, kdy jednotlivá zařízení mají nízkou výrobní cenu, jsou-li spojena do fungujícího systému, může-li být tento systém spojen s okolním světem a když může být systém programován a řízen, aby splňoval určitou funkci. Věříme, že to bude v případě nanotechnologií.

Literatura

- [1] Waser, R. (editor): Nanoelectronics and information technology. Wiley-VCH (2003), ISBN 3-527-40363-9.
- [2] <http://public.itrs.net>, The International Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose.
- [3] <http://www.intel.com>
- [4] <http://www.ibm.com>
- [5] <http://www.isi.edu/mosis/>

- [6] <http://www.sematech.org/public/about.htm/>
- [7] <http://www.te.ri.ac.uk/europractice/>
- [8] <http://tima-cmp.imag.fr/>
- [9] <http://www.pcmp.caltech.edu/>
- [10] <http://nano.xerox.com/nano/>
- [11] <http://www.icsi.berkeley.edu/>
- [12] Budoucnost chlazení: Nanotechnologie a iontový vítr. In:
http://www.svethardware.cz/art_doc-291DB24348E7189CC1256E65003F0F60.html
- [13] Taniguchi N.: „On the Basic Concept of Nanotechnology“, Proc.Int.Conf. on
Production Engineering, part 2, 1974, JSPE, Tokyo
- [14] <http://www.nanotechnologie.cz> nebo <http://www.nanoklastr.cz>: dobré poučení o
nanotechnologiích.
- [15] Fyzikální ústav AV ČR, www.fzu.cz