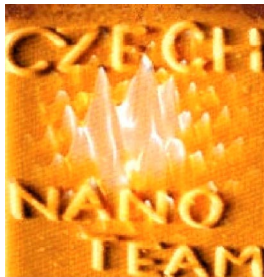


Nanotechnologie ve službách informatiky

aneb donutíme křemíkové nanokrystaly laserovat?



V č. 24/2004 TT jsme představili Czech Nanoteam a uvedli problémy mikroelektroniky, dravého a úspěšného průmyslového odvětví, které se objevují se vstupem mikroelektroniky do éry „nanoelektroniky“. Otevírají se totiž zcela nové možnosti využití unikátních kvantových jevů, ale vyvstává i několik zásadních problémů. S jedním z možných řešení těchto problémů Vás jako aktivní účastníky výzkumu v oblasti nanoelektroniky a členové Nanoteamu chceme seznámit.

PROČ VÁS POČÍTÁČ „TOPÍ“?

Všimli jste si, jak Váš osobní počítač „topí“? Potřebuje chladit ventilátorem a některé výkonnější servery se prodávají dokonce již s vodním chlazením. Příčinou této – pro uživatele jistě nepřijemné skutečnosti – je jednoduchý fyzikální zákon říkájící, že při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká teplo. Přenos informací mezi jednotlivými diskrétními prvky počítače, umístěnými na tzv. křemíkovém čipu, se totiž děje elektrickou cestou – pomocí velmi tenkých kovových spojů.

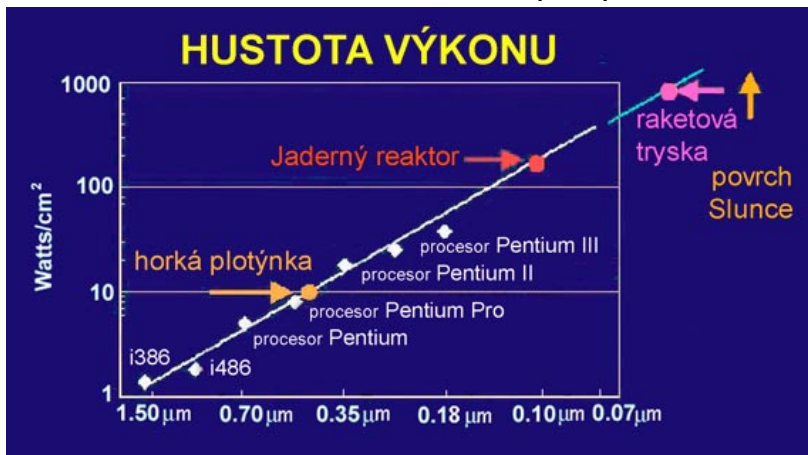
Je-li na jednom čipu o ploše řádově 1 cm^2 dnes umístěno více než 100 milionů diskrétních prvků, celková délka elektrických spojů tam dosahuje kolem 10 km! Mezinárodní „cestovní mapa“ pro polovodič předpovídá, že do deseti let se tato délka zvětší až na 90 km (!), a to díky stále se zmenšujícím rozměrům diskrétních součástek, tedy jejich stále vyšší plošné hustotě.

Tím se samozřejmě bude neustále zvyšovat množství neúspěšného energetického odpadu – vznikajícího tepla. Tento trend dokumentuje obr. 1, a zdá se, že brzy budeme mít, alespoň pokud se jedná o uvolněné teplo, na stole malý jaderný reaktor!

To však není bohužel vše. Ruku v ruce pak hrozí i jiné nepříjemné důsledky: Zpomalení přenosu dat na dlouhé cestě (a tedy zpomalení práce počítače) a přeslechy mezi těsně uloženými vodiči (a tedy ztráta či zkrácení přenášené informace, tj. chyby v práci počítače).

JSOU ŘEŠENÍM „FOTONY“?

Je únik z této slepé uličky? Fyzikové a inženýři již nějakou dobu principiální řešení znají: Nahradit elektrické spoje optickými. Příchodem světla optickými vlákny k zah-



Obr. 1 Hustota elektrického výkonu, nutná k napájení křemíkového čipu, vynesená v závislosti na typickém rozměru jednotlivého tranzistoru. U rozměru $0.5\ \mu\text{m}$ již bylo dosaženo disipace energie srovnatelné s elektrickým vařičem.

řívání nedochází a navíc se práce počítače urychlí, neboť částice světla – fotony – se pohybují rychleji než nosiče elektrického proudu – elektrony. Tento tzv. optoelektronický přenos dat se používá v řadě jiných aplikací (mimo desku počítače) již dlouho, např. pro přenos informací mezi počítači, pro telefonní hovory, v televizní technice atd.

V cestě tomuto elegantnímu řešení však stojí jedna zásadní překážka: **neexistuje vhodný zdroj světla**. Musí splňovat tyto podmínky: **miniaturní rozměry**, napájení elektrickým proudem o minimálním výkonu a – především – možnost

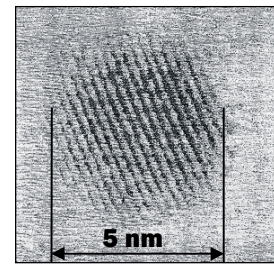
obvodu, je prakticky neúčinný jako zdroj světla (jeho fotoluminiscence, resp. elektroluminiscence jsou zanedbatelné). Tato skutečnost vyplývá ze specifické struktury elektronových stavů resp. energetických pásů v křemíku a je tudíž dána samotnou přírodou.

CO S TÍM MŮŽEME DĚLAT?

Nabízejí se dvě cesty, jak se pokusit uведенou překážku obejít. První je implementovat do krystalického křemíku miniaturní laser vyrobený z jiného polovodiče (z arsenidu galia GaAs nebo podobného materiálu, vykazujícího intenzivní luminiscen-

sokým rozlišením ukazuje obr. 2.

Soustředíme se nyní na dva aspekty: Jak se vůbec dají tak malé křemíkové nanokrystaly vyrobit a, za druhé, jakou mají tyto nanokrystaly šanci k tomu stát se aktivním prostředím v laseru? (Ponecháme stranou fundamentální otázku proč u nanokrystalů křemíku dochází k tak zásadní změně optických vlastností. Mimochodem, dodnes to není teoreticky zcela uspokojivě vysvětleno, i když podstatnou roli hraje zcela jistě lokalizace nositelů náboje v potenciálové jámě reprezentované nanokrystalem a překrytí jejich vlnových funkcí, čímž dochází ke zvýšení

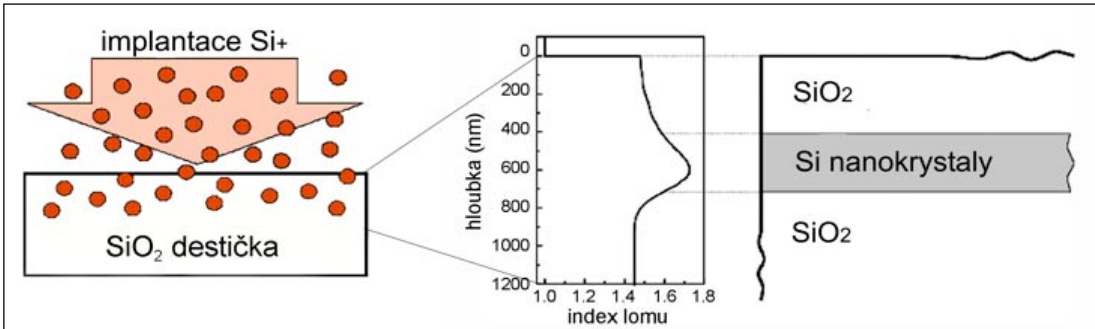


Obr. 2. Nanokrystal křemíku, jak jej vidí transmisní elektronový mikroskop s vysokým rozlišením. Jsou dobře patrné jednotlivé atomární roviny.

Vrstvička porézniho křemíku se pak snadno mechanicky oddělí ve formě prášku obsahujícího nanokrystaly, ten se nasype do optické květy a zalije kapalným SiO_2 . Po zatuhnutí vznikne na dně květy vysoce koncentrovaná vrstva nanokrystalů, která je tímto způsobem, podobně jako při iontové implantaci, zabudována do opticky čiré skleněné matrice a oranžově svítí při buzení ultrafialovým světlem (viz. obr. 4).

CO JEŠTĚ SCHÁZÍ NA CESTĚ KE KŘEMÍKOVÉMU LASERU?

Především je třeba prokázat, že v takto připravených vzorcích – vlastně svítící „rovině“ složené z hustě uspořádaných křemíkových nanokrystalů – se světlo může zesilovat, čili že vykazuje kladný optický zisk. To se nám díky unikátním metodám (např. „metodou proužku s proměnnou délkou“) v těsné spolupráci s Univerzitou Karlovou v Praze a Univerzitou L. Pasteura ve Štrasburku podařilo (podrobnosti je



Obr. 3 Schéma tvorby křemíkových nanokrystalů iontovou implantací. Vlevo je znázorněno „nastřílení“ iontů Si^+ do křemenné destičky, prostřední panel ukazuje průběh hustoty Si nanokrystalů (tedy i průběh indexu lomu) na přířezu vzorkem a vpravo uložení vrstvy nanokrystalů – těsně pod povrchem destičky.

snadné integrace do křemíkového čipu. Je pravda, že miniaturní injektory polovodičové lasery (laserové diody) jsou dnes běžnou spotřební součástíkou a svítí na široké škále vlnových délek od ultrafialové po infračervenou oblast, ale žádný z nich není vyroben z křemíku. Křemík totiž, ať je jakkoli excelentním materiálem pro mikroelektroniku s vysokým stupněm integrace, tedy pro tranzistory a integrované

ci). To naráží vzápětí na další problém – vypěstování vrstvičky GaAs na křemíkové podložce je velmi obtížné, protože mířkové konstanty obou materiálů se liší natolik, že neumožňují pravidelné periodické uspořádání atomů Ga a As na podložce z křemíku. Druhá cesta, na kterou jsme se vydali my, je využít unikátních vlastností **nanokrystalů křemíku**, tedy **křemíkové nanotechnologie**.

Křemík ve formě nanokrystalů o průměru 2 – 5 nanometrů (1 nanometr = $1/1000\ 000\ 000$ metru) se totiž chová, posuzováno z hlediska jeho luminiscenčních vlastností, diametrálně odlišně od objemového (krystalického) křemíku. Jeví pod ultrafialovým světlem velmi intenzivní viditelnou luminiscenci, jejíž barvu lze dokonce ladit, v závislosti na velikosti nanokrystalů, od červené přes oranžovou a žlutou až k modré. Tento efekt je znám a studován již více než deset let, nicméně od samotného jevu fotoluminiscence (tj. luminiscence buzení světlem o jiné vlnové délce) k sestrojení fungující součástky – injektčního laseru buzeného elektrickým proudem – je velmi dlouhá cesta. Zobrazení křemíkového nanokrystalu pomocí transmisního elektronového mikroskopu s vy-

pravděpodobnosti zářivé rekombinace, viz TT 3/2004, str. 26).

JAK NANOKRYSTALY KŘEMÍKU VYRÁBÍME?

Jednou z metod přípravy nanokrystalů křemíku, kterou používají např. na Austrálské národní univerzitě v Canbeře, je iontová implantace. Do destičky z křemenného skla jsou „nastříleny“ ionty Si^+ (obr. 3) a destička se poté zahřeje na vysokou teplotu ($1100\ ^\circ\text{C}$), přičemž se ionty neutralizují a z „přesyceného roztoku“ se vysrážejí do sférických nanokrystalů o průměru 3 – 5 nm. Po vychladnutí pak destička jeví červenou fotoluminiscenci, což jsme si na austrálských vzorcích měli možnost ověřit.

Jinou, a to daleko levnější a jednodušší metodou, kterou jsme ve Fyzikálním ústavu Akademie věd v Praze rozvinuli, je elektrochemické leptání. Povrch desky krystalického křemíku, která je ponořena jako elektroda do nádobky s roztokem kyseliny fluorovodíkové HF (druhá elektroda je obvykle platinová), je při průchodu elektrického proudu leptán a vzniká tzv. porézni křemík, houbovitá struktura s kanálky a ostrůvky o nanometrových rozměrech. Ty zbylé ostrůvky jsou vlastně shluky křemíkových nanokrystalů.

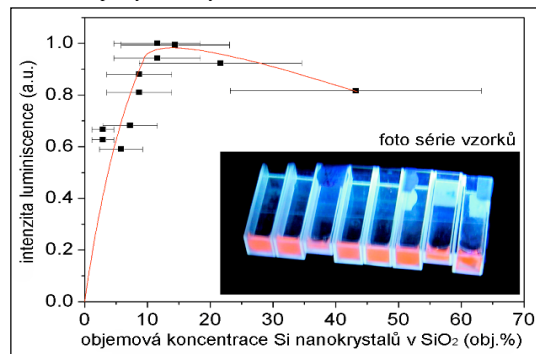
možno nalézt např. v Československém čas. pro fyziku, č. 6 (2004))

Zdá se, že šance laserovat pro křemíkové nanokrystaly tedy opravdu existuje, neboť výsledky velmi podobné našim byly v posledních dobách získány i v několika jiných zahraničních laboratořích (Itálie, USA, Finsko). Problém je tudíž vyřešen, nedočkavý elektronický průmysl nám trhá výsledky z rukou a rozjízďá sériovou výrobu křemíkových laserů?

Bohužel ne tak docela. V duchu Čelakovského „sotva přejdeš jedny hory, hned se najdou jiné“ se vynořuje ještě jeden, neméně závažný problém: Křemíkové nanokrystaly prozatím jeví ochotu vysílat laserové záření pouze při optickém buzení. Pro sestrojení injektčního laseru však bude nezbytné buzení elektrické, je tedy třeba ještě pochopit zákonitosti vedení elektrického proudu v křemíkových nanokrystalech.

Jaká je tedy odpověď na otázku, položenou v titulku? I když ke konečnému cíli – křemíkovému laseru, který lze zabudovat do integrovaných obvodů – je ještě dlouhá cesta, její kontury se již začínají jasně rýsovat. •

MGR. KATEŘINA DOHNALOVÁ
PROF. IVAN PELANT, DRSc
FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR, PRAHA



Obr. 4 Foto sady optických květ s luminiscující vrstvou křemíkových nanokrystalů usazených na dně. Křivky znázorňují, jak závisí intenzita luminiscence na hustotě nanokrystalů.