

Seriál: Elektrón, elektronika, spin... Spintronika!

Úvod seriálu 40. ročníka

Milí riešitelia, vitajte pri ďalšom, tento rok jubilejnom 40. ročníku seriálu fyzikálneho korešpondenčného seminára FYKOS. Tento rok sme sa rozhodli vybrať tému, ktorá je v súčasnosti veľmi aktuálna a navyše v odbore, v ktorom práve česká veda vytvorila podstatnú stopu. Tento seriál sa bude venovať súčasnej *spintronike*.

Ide pritom o multidisciplinárnu tému, na ktorú sa budeme pozerat z viacerých pohľadov. Rozoberieme si aktuálne výsledky, ako pomohli dnešnej elektronike, súčasné trendy, možné ďalšie revolúcie, ale aj koncepty, ktoré síce vyzerali teoreticky veľmi nádejne, neskôr sa však ukázali technické problémy, ktoré znemožnili ich realizáciu.

Z fyzikálneho hľadiska budeme riešiť elektrické a magnetické vlastnosti materiálov, ale aj ich ultrarýchlu odozvu. V rámci príkladov budete riešiť jednoduché výpočty a modelovanie, no taktiež na vás čakajú úlohy zamerané čisto na symetriu daných problémov.

Ako funguje počítač?

Základom celého spracovania informácie je tzv. binárna logika. Kompletná informácia sa prepisuje do bitov s možnými hodnotami 0 a 1, ktoré môžu zodpovedať rozličným informáciám. Napríklad logické hodnoty môžu reprezentovať jednoducho pravdu a nepravdu (True/False). Uložiť sa dá aj komplikovanejšia informácia, napríklad číslo 3 by bolo v tzv. integer forme zapísané ako 0011. Výpočet následne prebieha pomocou rôznych logických brán, ktoré s dátami vykonávajú požadované operácie. Ak by sme napríklad dvom výrokom priradili dva bity a chceli by sme od počítača vedieť, či platia oba naraz, použili by sme logické hradlo (logic gate) AND.

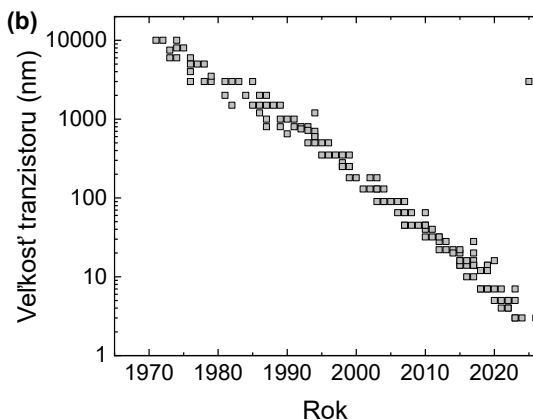
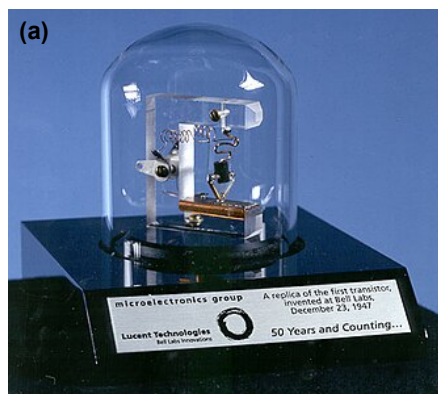
Ako však vieme, súčasné počítače sú výrazne komplikovanejšie a dokážu plniť rôzne funkcie od spájania ľudí cez videohovory, prehrávania filmov až po sofistikované vedecké výpočty. Na to, aby mohli takto fungovať, pracujú na báze tzv. Von Neumannovej schémy. Tá sa skladá z dvoch hlavných častí: procesora a pamäte. Procesor je čip, ktorý vykonáva inštrukcie a výpočty. Zároveň ide o centrálny a najrýchlejší komponent v počítači. Napríklad procesor v počítači autora seriálu vykonáva inštrukcie s frekvenciou 1,8 GHz. Pamäť je miesto, kde sa dáta a programy ukladajú. Donedávna túto úlohu plnili magnetické pevné disky, kde mechanicky sa pohybujúci senzor snímал magnetické pole, na základe ktorého určoval hodnoty bitov (o tom sa dozvieme viac v ďalšom dieli seriálu). Pre mechanický pohyb senzora bol tento komponent príliš pomalý (napr. moderné disky majú okolo 7200 rpm (revolutions per minute), čomu zodpovedá približne 120 Hz). Tento priepastný rozdiel sa vyrovnáva pomocou operačnej pamäte (RAM), kam sa nahrávajú aktuálne potrebné údaje. Zároveň sa po vypnutí všetky dáta automaticky zmažú. Hoci je táto pamäť už výrazne rýchlejšia, stále na procesor úplne nestačí. Na to potom slúžia ešte rýchlejšie vyrovnávacie pamäte L1 až L3, pričom L1 je najrýchlejšia (s kapacitou iba v kilobajtoch) a L3 najpomalšia (s kapacitou v desiatkach megabajtov).

Táto technológia fungovala veľmi dlho, avšak v dnešnej dobe už naráža na svoje limity...

Elektronika v problémoch

Prvým nedostatkom vyššie spomenutého prístupu je to, že procesor dokáže spracovávať informácie rýchlejšie, než ich pamäť dokáže dodávať (tiež známy ako *The von Neumann bottleneck*), čo celý „ekosystém“ zbytočne spomaľuje. Navyše nemožno predpokladať ďalší výrazný posun, pokiaľ sa významne nezmení celá architektúra.

Ďalším nie úplne zrejším problémom sú energetické nároky a disipácia tepla. Určite všetci poznáme ten pocit, keď po dlhšej práci notebook chytíme zospodu a cítime, aký je teplý. To je časť energie, ktorá sa nevyužila na spracovanie a uloženie informácie a premenila sa na teplo. Toto napríklad limituje vyššie taktovacie frekvencie procesorov. Disipáciu tepla si predstavíme aj v seriálovej úlohe.



Obrázek 1: (a) Prvý tranzistor skonštruovaný v Bellových laboratóriách v roku 1947. (b) Veľkosť tranzistora podľa roku¹. Všimnite si logaritmickú zvislú os, ktorá jasne ukazuje trend miniaturizácie tranzistorov, ktorý spravidla Moorov zákon.

Odhliadnuc od vyššej taktovacej frekvencie, výkon procesorov by bolo možné zvýšiť aj väčším nahustením jednotlivých jednotiek, ktoré informáciu spracovávajú. V praxi je toto riešené tranzistormi, pričom aktuálna technológia umožňuje ich zmenšenie až na 2 nm.² Cesta k tejto technológii bola veľmi dlhá a prvé tranzistory rozhodne nemali podobne malé rozmery, čo možno vidieť napríklad na obr. 1(a), kde je zobrazený prvý bodový tranzistor skonštruovaný v Bell Laboratories v New Jersey, USA. Odvtedy tranzistory prešli výrazným vývojom a postupným zmenšovaním, ktoré po dlhú dobu sledovalo tzv. Moorov zákon³: počet tranzistorov na čipe sa zdvojnásobí každé dva roky pri zachovaní približne rovnakej výrobnéj ceny, čo možno pekne vidieť na časovom vývoji veľkosti tranzistorov na obr. 1(b). Z fyzikálneho hľadiska však ten-

¹Prevzaté z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count#Microprocessors

²Ide však skôr o marketing. V skutočnosti sa veľkosť jednotlivých tranzistorov pohybuje v desiatkach nm.

³Hoci je názov „Moorov zákon“ všeobecne zaužívaný, správnejšie by bolo pomenovanie „trend“ alebo „predpoved“, keďže nejde o reálny fyzikálny zákon, ale skôr empirický trend.

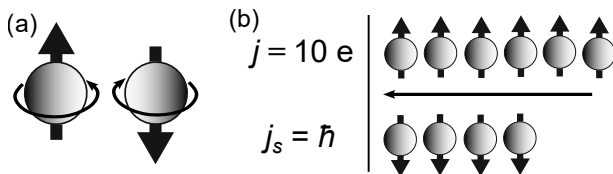
to trend nie je možné nasledovať, pretože by bol v istom momente tranzistor tvorený len pár atómami a začali by sa prejavovať kvantové efekty.

Zároveň je technologický vývoj potrebný, keďže v súčasnosti prežívame obrovský AI boom, ktorý spotrebúva veľa elektrickej energie a dokonca niektoré zdroje tvrdia⁴, že tento trend nemusí byť dlhodobou udržateľný. Jeden z veľmi perspektívnych smerov vývoja, či už efektívnejších existujúcich komponentov, alebo súčiastok do úplne nových neneumannovských zariadení predstavuje zapojenie nielen náboja elektrónu, ale aj jeho vnútorného momentu hybnosti – *spinu*.

Spin, spintronika a spinové prúdy

Hoci pravdepodobne už väčšina z vás má nejaké skúsenosti so spinom zo strednej školy, je dobré túto predstavu trochu viac rozviesť. Spin elektrónu je jeho vnútorný moment hybnosti, vďaka ktorému si nesie aj vlastný magnetický moment. Často sa pôvod spinu vysvetľuje pomocou rotácie elektrónu okolo vlastnej osi, pričom vďaka jeho náboju by malo vzniknúť pridružené magnetické pole. Kvalitatívne by tento model síce popísal vznik magnetického momentu elektrónu, po kvantitatívnej stránke narazíme na zopár problémov, ktoré si budete môcť vyskúšať v seriálovej úlohe. Navyše treba podotknúť, že spin a magnetický moment majú aj častice, ktoré žiaden náboj nemajú, napríklad neutróny.

Ako potom nahliadať na spin? Spin je vnútorný kvantový moment hybnosti častice. Jeho úplný opis a vzťah k magnetickému momentu prirodzene vyplývajú z relativistickej kvantovej mechaniky, čo je téma, ktorá výrazne prekračuje tému tohto seriálu, a preto sa jej nebudeme viac venovať. Sústrediť sa budeme na spintroniku a o spine budeme vždy hovoriť ako o vnútornom momente hybnosti, ktorý budeme značiť šípku. Zároveň však ide o tzv. kvantový moment hybnosti, ktorý je v prípade elektrónov poločíselný. V praxi to znamená, že ho môžeme popisovať pomocou dvoch projekcií: „nahor“ a „nadol“; viď obr. 2(a).



Obrázek 2: (a) Spin elektrónu a klasická predstava o jeho rotácii. (b) Ilustrácia nábojového a spinového prúdu podľa hlavného textu. Zatiaľ čo nábojový prúd je jednoducho tok 10 elektrónov, spinový prúd je rozdiel v pretečenom spine, teda iba „2 spiny nahor“.

Podobne ako klasický elektrický prúd predstavuje prenos náboja, my by sme náš spin tiež radi prenášali. Ako na to? Môžeme si pomôcť klasickou definíciou prúdu, teda že prúd je veľkosť náboja, ktorý pretečie určitou plochou za jednotku času. My nechceme prenášať náboj, ale spin; a preto nás bude zaujímať, koľko spinu pretečie určitou plochou za jednotku času. V rámci seriálu však bude praktickejšie pracovať s hustotou prúdu $j = \Delta I / \Delta S$. Majme napríklad nábo-

⁴A. Prieto, B. Prieto, J. J. Escobar, and T. Lampert, „Evolution of computing energy efficiency: Koomey’s law revisited“, Cluster Computing 28, 42 (2025).

jový prúd tvorený 10 elektrónmi (obr. 2(b)), ktoré pretečú plochou 1 m^2 za 1 sekundu. Prúdová hustota (v príslušných základných jednotkách) potom číselne bude

$$j = 10 \cdot e,$$

kde e je elementárny náboj elektrónu. Teraz však uvažujme, že 6 z týchto elektrónov bude mať jeden spin („nahor“, $\uparrow$) a 4 opačný („nadol“, $\downarrow$). V takom prípade bude spinový prúd⁵

$$j_s = \frac{\hbar}{2}(6\uparrow + 4\downarrow) = \frac{\hbar}{2}(6\uparrow - 4\uparrow) = \hbar,$$

kde $\hbar/2$ je veľkosť spinu a $\hbar$ je redukovaná Planckova konštanta.

So spinovým prúdom, jeho vznikom a rôznymi formami sa budete môcť zoznámiť v seriálovej úlohe. Tú hravo zvládnete, keď si uvedomíte, že vás zaujíma celkový tok spinu cez určitú oblasť. Zároveň treba zdôrazniť, že spinový prúd tu definujeme ako pohyb elektrónov, ale v realite môže byť spinový prúd prenášaný rôznymi ďalšími kanálmi, ako napríklad spinovými vlnami, čo si vyskúšate podobne v seriálovej úlohe.

Týmto (dúfam) jednoduchým úvodom do seriálu sa rozlúčime a v ďalšom dieli si povieme niečo o feromagnetoch, magnetických pevných diskoch, ďalších spintronických komponentoch a o tom, vďaka čomu sú také efektívne. Od ďalšieho dielu začneme taktiež modelovať, preto by som vás poprosil, aby ste si nainštalovali softvér **Octave Forge**⁶, v ktorom budeme robiť malé modelovanie. Odkaz vedie na stránky s inštalačnými súbormi pre operačný systém Windows, kde si vyberte najnovšiu verziu a nainštalujte si ju. Žiadne ďalšie neštandardné balíčky zatiaľ nebudú nutné.

Peter Kubaščík

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁵Treba zdôrazniť, že oproti klasickému prúdu existuje niekoľko konvencií na spinový prúd. Tu pre jednoduchosť spinový prúd definujeme ako tok momentu hybnosti. Keby sme spinový prúd počítali ako rozdiel nábojových prúdov, je potrebné ešte pridať koeficient $\hbar/(2e)$, ktorý prevedie nábojový prúd na tok uhlového momentu hybnosti.

⁶<http://sourceforge.net/projects/octave/files/OctaveWindowsbinaries>