

Co to je, když se řekne spintronika

Toulky po technologii s fyzikálními zastávkami

Ondřej Šipr

Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, Praha

<http://www.fzu.cz/~sipr>

Univerzita třetího věku

Fyzika pro nefyziky

Trója, 20. února 2023

Motivace: něco je potřeba udělat

Čistá planeta pro všechny (2018):

Evropská dlouhodobá strategická vize prosperující, moderní, konkurenceschopné a klimaticky neutrální ekonomiky.

Představuje vizi, která může vést k dosažení nulových čistých emisí skleníkových plynů do roku 2050.

Ovšem:

Tranformace počítá s technologiemi, které **teprve mají být vyvinuty**.

Spinová elektronika alias **spintronika** by mohla být jednou s důležitých součástí mixu nových technologií.

Osnova

Co už máme: elektronika

Odborníkem na magnetismus elektronů snadno a rychle

Spintronika: jevy a procesy

Spintronika: materiály

Co už máme: elektronika

Odborníkem na magnetismus elektronů snadno a rychle

Spintronika: jevy a procesy

Spintronika: materiály

Elektron jako kvantový objekt

Elektron není jen malá nabitá kulička.

Jde o nabitou kuličku se zvláštními a trošku divnými vlastnostmi.

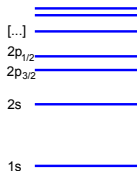
Tyto vlastnosti dobře popisuje kvantová fyzika.

Pro popis elektronu v pevné látce (tj. vevnitř v materiálu) je použití kvantové fyziky nezbytné.



Energetické hladiny a pásy

Ne všechny hodnoty energie jsou přípustné: energie je kvantovaná.



Elektron v atomu smí mít **jen některé** pevně dané **hodnoty** energie.

Elektron v pevné látce smí mít energii **jen v určité oblasti**.

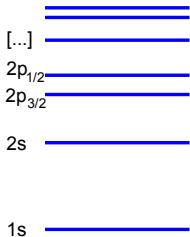
Energetické hladiny.

Energetické pásy.

Na kvantové dálnici se auta smí pohybovat pouze určitými rychlostmi.

Přípustné hodnoty jsou 56 km/h, 78 km/h, 85 km/h, cokoliv mezi 97 km/h a 112 km/h a cokoliv vyššího než 132 km/h.

Obsazené a neobsazené stavy



Energie elektronu spolu s některými dalšími vlastnostmi určují **kvantový stav elektronu**.

Pauliho vylučovací princip: v **jednom stavu** smí být pouze **jeden elektron**.

Elektronové stavy se obsazují postupně od nejnižší energie směrem nahoru.

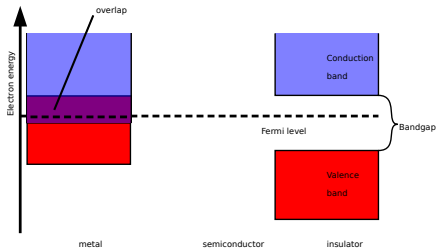
Některé energetické hladiny/pásky jsou **obsazené**, tam už elektron je a proto tam žádný další už nesmí.

Jiné energetické hladiny/pásky jsou **neobsazené**, do nich elektron může.

Jede-li na kvantové dálnici některé auto jednou z přípustných rychlostí, jiné auto už tou rychlostí jet nesmí.

Dovolené rychlostí se autům přidělují po řadě jedna po druhé a začíná se tou nejnižší.

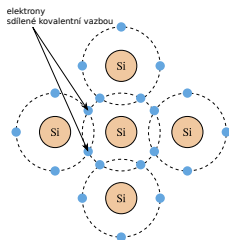
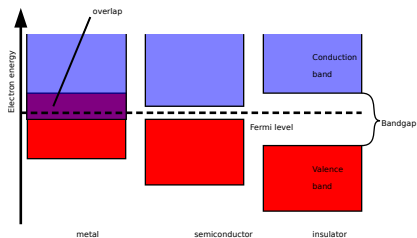
Kovy a izolanty



Kovy: Oblasti (“pásy”) povolených hodnot **se překrývají**.
k přesunu elektronu z jedné energetické oblasti do druhé stačí i jen velmi malý podnět.
Elektrony se **mohou** krystalem **volně pohybovat**.

Izolanty: Oblasti (“pásy”) povolených hodnot **se nepřekrývají**.
Přesun elektronu z jedné energetické oblasti do druhé není možný (byl by k tomu potřebný příliš velký podnět).
Elektrony se **nemohou volně pohybovat** krystalem.

Polovodiče: spíše poloizolanty. . .



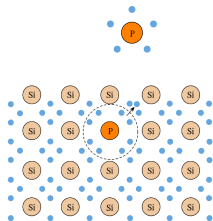
nagwa.com

Rozdíl mezi energiemi obsazených a neobsazených hladin je u polovodičů menší než u izolantů.

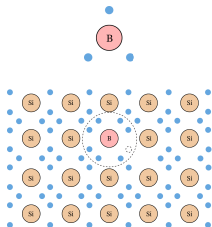
Volné elektrony v polovodiči nejsou, polovodič elektřinu nevede (při nulové teplotě).

Jak z polovičních izolantů udělat kovy

Dopováním atomy s jiným počtem vazebných elektronů můžeme z polovodiče udělat kov (byť nijak zvlášť dobrý).



přidali jsme **volné elektrony**
polovodič typu N



přidali jsme **volné díry**
polovodič typu P

nagwa.com

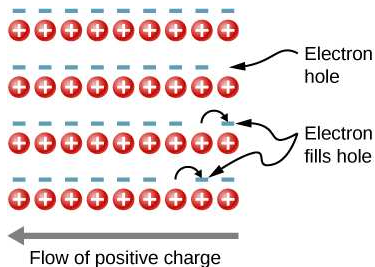
Elektrický proud vedou buď volné elektrony (polovodič typu N)
nebo volné díry (polovodič typu P).

Elektrony a díry



wikimedia.org

Díra je nic v něčem.



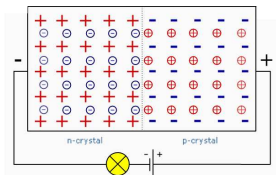
phys.libretexts.org

Přesouvání elektronů můžeme ekvivalentně popsat jako přesouvání díry.

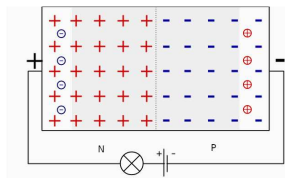
Užitečnost polovodičů plyne z toho, že proud v nich mohou vést jak záporně nabitě **elektrony**, tak kladně nabitě **díry**.

Dva polovodiče vedle sebe: PN přechod

Dioda: přiložíme k sobě polovodič typu N a typu P.
Tím vytvoříme PN přechod.



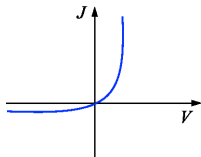
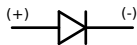
halbleiter.org



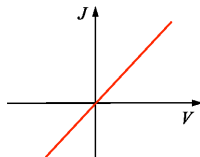
Je-li na PN přechod (tj. na polovodičovou diodu) přiloženo napětí v propustném směru, proud **může procházet**.

Je-li na PN přechod přiloženo napětí v závěrném směru, proud **procházet nemůže**.

Co je na PN přechodu tak skvělého?



polovodičová dioda



obyčejný odpor

Usměrnjuje:

Proud může jít jen jedním směrem.

Zesiluje:

Malá změna napětí vede k velké změně proudu.

Na vrstvení a kombinování PN přechodů je založená veškerá elektronika.

Co přijde po polovodičové éře?

Citius, Altius, Fortius

Pierre de Coubertin

Proč nám polovodiče přestávají stačit:

1. v miniaturizaci jsme došli skoro k atomárním rozměrům.
Další zlepšování tímto směrem přestává být možné.
2. Přesun náboje generuje teplo.
Energie!

Co už máme: elektronika

Odborníkem na magnetismus elektronů snadno a rychle

Spintronika: jevy a procesy

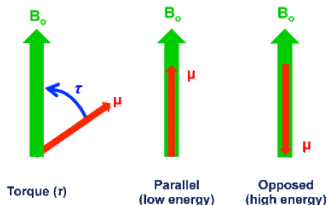
Spintronika: materiály

Odkud se magnetismus bere?

- ▶ V klasické fyzice, magnetismus je *něco*, co je generováno **pohybujícími se náboji** a co ovlivňuje jiné **pohybující se náboje**.
- ▶ Podle speciální teorie relativity je magnetismus *fiktivní síla*, kterou je nutno zavést pro zachování **Lorentzovské invariance** při pohybu nábojů.
 - ▶ Co jeden pozorovatel vnímá jako magnetickou interakci, vnímá jiný pozorovatel jako pouhou elektrostatickou sílu.
 - ▶ Žádná samostatná magnetická síla neexistuje, vše lze popsat Coulombickou interakcí (přitažlivou či odpudivou silou mezi nabitými náboji).

Magnetický moment

Magnetický moment μ charakterizuje snahu magnetických objektů orientovat se podle vnějšího magnetického pole.

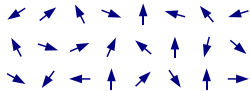


<https://mriquestions.com/magnetic-dipole-moment.html>

Magnetickou látku můžeme popsat jako soubor magnetických momentů (čili ledničkových magnetů zmenšených na rozměry atomů).

Magnetické uspořádání

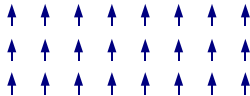
V magnetických látkách mohou magnetické momenty spjaté s atomy být uspořádány.



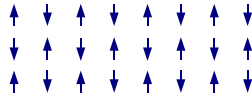
paramagnetismus

Magnetické momenty neuspořádané.

Paramagnetické látky.



feromagnetismus



antiferomagnetismus

Celkový magnetický moment antiferomagnetik je nulový.

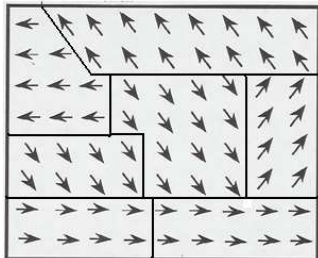
Na magnetické pole nicméně nějakým způsobem reagují.

Magnetické domény

Feromagnetické materiály (železné předměty) na něž obvykle narazíme nebývají zmagnetované.

Je to tím, že magnetické uspořádání probíhá v rámci jednotlivých domén.

- ▶ Magnetická doména: oblast, kde je magnetizace stejná.
- ▶ Není-li přiloženo vnější pole, celková (průměrná) magnetizace je nulová.



Co už máme: elektronika

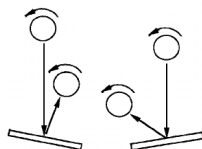
Odborníkem na magnetismus elektronů snadno a rychle

Spintronika: jevy a procesy

Spintronika: materiály

Elektrony mají spin

Elektron je projevuje, jako kdyby se otáčel kolem své osy jako vlček.



R. Cross. Am. J. Phys. (2005)

Když dojde na detaily, představa představa elektronu jako nabitě rotující kuličky selhává.

Což tak moc nevadí, neboť s elektronem a jeho spinem dokážeme pracovat, i když si to neumíme předtavit.



Co to spin je doopravdy nevíme.

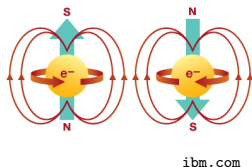
Ale umíme jej změřit, umíme jeho projevy spočítat a doufáme, že jej budeme umět i **využívat pro své potřeby.**

Se spinem elektronu je spjatý magnetický moment

Pohybující se elektrický náboj vytváří magnetické pole.

Nabitá elektronová kulička se může točit doleva nebo doprava.

Magnetický moment spojený se spinem elektrony může mít dva směry: nahoru a dolů.



Elektrony s opačnou orientací spinu budou **jinak reagovat na magnetické pole.**

Analogie:

Elektrony a díry v polovodičích jakožto částice s opačným nábojem reagují na elektrické pole každý jinak.

Spintronika: o co se snažíme

Elektronika:

Prvky logických obvodů (tedy toho, co v počítačích zaznamenává nuly a jedničky a pracuje s nimi) jsou založeny na **přenosu náboje elektronů**.

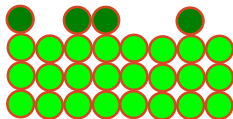
Spinová elektronika neboli spintronika:

Prvky logických obvodů jsou založeny na **přenosu spinu elektronů**.

Terminologická vsuvka:

Když řekneme spin elektronu, máme na mysli magnetický moment spojený s mechanickým spinem s rotací kolem osy.

Elektrická vodivost



Vodivost kovů je úměrná množství volných elektronů s nejvyšší energií (Fermiho energií):

jen ty mohou se začít hýbat.

Pauliho vylučovací princip: Elektrony s energií nižší než je Fermiho energie nemohou vlivem elektrického pole změnit svůj stav, protože v jejich nejsou žádné dovolené a současně neobsazené stavy.

(Žádné stavy nejsou v jejich okolí ve fázovém nebo spíše stavovém prostoru, ale kdo by řešil detaily. . .)

Elektrony v magnetickém kovu

1. V magnetickém kovu se budou elektrony s různým spinem chovat **různě**.
2. V magnetickém kovu je elektronů se spinem orientovaným jedním směrem více než elektronů se spinem orientovaným druhým směrem.
Více elektronů se v něm točí doleva než doprava.

Terminologie:

Majoritní elektrony, majoritní směr spinu.

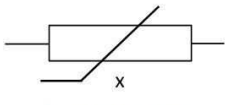
Minoritní elektrony, minoritní směr spinu.

Vodivost zprostředkovaná elektrony s majoritním spinem je vyšší než vodivost zprostředkovaná elektrony s minoritním spinem (protože těch prvních je více.)

Magnetorezistence

Ideální zcela pravidelný kovový krystal by měl nekonečnou vodivost.

Elektrický odpor je způsoben tím, že elektrony při svém putování kovem narážejí na různé nepravidelnosti jako jsou tepelné kmity krystalové mřížky, příměsi, případně i jiné elektrony.



Magnetorezistence:
elektrický odpor se mění, když přiložíme magnetické pole.

Spinový usměrňovač: obrovská magnetorezistence

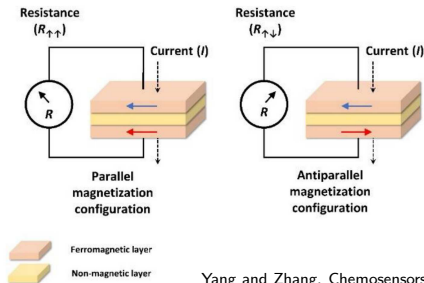
Směr magnetizace jednotlivých vrstev se dá měnit (přepínat) tak, že buď jsou obě vrstvy zmagnetizovány souhlasně nebo opačně.

Propouští dobře pouze elektrony s jedním spinem.

Spinový ventil.
Usměrňovač.

Čtecí hlavy hard-disků zhruba 2000–2010.

Dva magnety s vloženým nemagnetickým kovem.

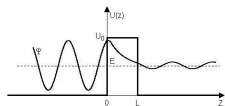
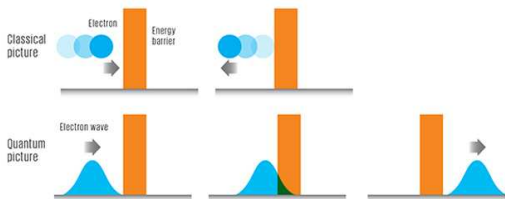


Yang and Zhang, Chemosensors (2021)

Paralelní:
Elektron, který se šíří
dobře jednou vrstvou, se
bude dobře šířit i druhou
vrstvou.

Antiparalelní:
Elektron, který se šíří
dobře jednou vrstvou,
bude se šířit špatně
druhou vrstvou.

Tunelový jev



physicsopenlab.org

Intenzita proudu protunelovaných částic rychle klesá s výškou bariéry.

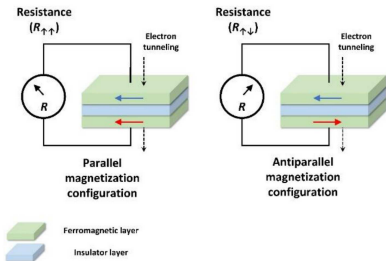
Klasická částice může projít bariérou, jen když má dostatečnou energii.

Kvantový elektron může bariérou “protunelovat”, i když na to jeho energie nestačí.

Kvantový volejbalový míč občas projde na druhou stranu hřiště, i když dáte podání do sítě.

Tunelovací magnetorezistence

Magnetické tunelovací výhybky (magnetic tunneling junction).



Paralelní: elektrony s majoritním spinem mohou **dobře** tunelovat, protože **na druhé straně mají k dispozici dostatek stavů** se stejným spinem.

Antiparalelní: tunelování je **obtížné**, protože elektrony s majoritním spinem **nenajdou na druhém konci dostatek stavů** se stejným spinem.

Podobné jako u magnetických multivrstev, ale elektrony tunelují přes bariéru tvořenou izolantem.

Yang & Zhang, Chemosensors (2021)

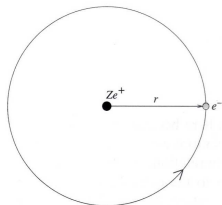
Filtrování (“usměrňování”) spinů desetkrát účinnější než u magnetických multivrstev.

Na tunelovací magnetorezistenci založeny čtecí hlavy disků dnes.

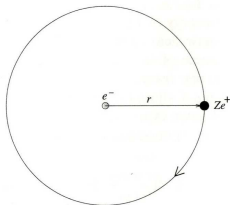
Spin-orbitální interakce

Interakce mezi spinem elektronu a jeho vlastním pohybem.

(Jako když se snažíte zvednout sami sebe za límec.)



rest frame of the nucleus
posuzováno vzhledem k jádru



rest frame of the electron
posuzováno vzhledem k elektronu

Relativistický jev:
Elektron obíhá kolem jádra.

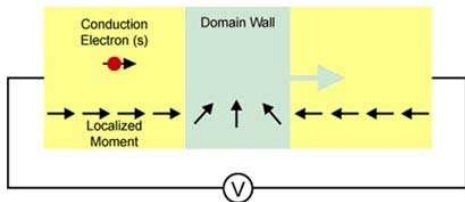
Ve vztažné soustavě
elektronu ovšem jádro obíhá
kolem elektronu.

Jádro obíhající kolem elektronu generuje proud, tento proud generuje magnetické pole a toto magnetické pole interaguje se spinem elektronu, kolem něhož jádro obíhá.

Změna směru magnetizace proudem

Tradičně: směr magnetizace materiálu se přepne vnějším magnetickým polem.

Nově: místo vnějšího pole použijeme na přepínání magnetického stavu procházející proud.



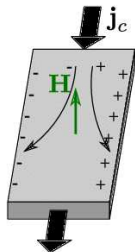
Proud ovlivňuje prostředí, kterým protéká. Podstatná je spin-orbitální interakce.

wikimedia.org

Protéká-li spinově vyfiltrovaný (polarizovaný) proud elektronů magnetem, může změnit orientaci magnetizace tohoto magnetu.

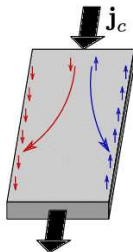
Koncept možných budoucích “traťových pamětí:” Racetrack memories.

Spinův Hallův jev



Hall effect

(Normální) Hallův jev:
odseparuje **elektrony** od
děr.



spin
Hall effect

Spinový Hallův jev:
odseparuje **opačné**
orientace spinu.

Umožňuje manipulovat
proudem spinů.

Spin-orbitální interakce
opět podstatná.

Eckern, Gorini, Raimondi, Tolle (2016)

Co už máme: elektronika

Odborníkem na magnetismus elektronů snadno a rychle

Spintronika: jevy a procesy

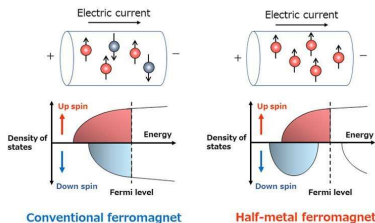
Spintronika: materiály

Polokovy

Kovy (vodiče) pro elektrony se **spinem orientovaným jedním směrem**.

Izolanty pro elektrony se **spinem orientovaným druhým směrem**.

Elektrony, které zprostředkovávají elektrický proud v polokovu, mají všechny stejnou orientaci spinu.



Tohoku University, phys.org

Polokovy mohou fungovat jako spinové filtry: proud jimi protékající je tvořen elektrony výhradně s jednou orientací spinu.

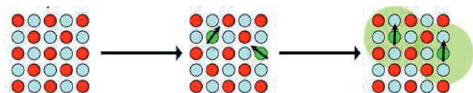
Magnetismus a teplota

- ▶ Zvyšuje-li se teplota, magnetické uspořádání je oslabováno tepelným pohybem (entropií).
- ▶ Při určité hraniční teplotě $T < T_C$ dojde k fázovému přechodu a magnetizace vymizí.
- ▶ Materiály mohou být magneticky uspořádány jen pro $T < T_C$.
 - ▶ T_C (Fe) = 1040 K, T_C (Co) = 1400 K, T_C (Ni) = 631 K
→ u běžných materiálů se při pokojové teplotě pohybujeme bezpečně pod T_C .
 - ▶ Ale u speciálních materiálů zajímavých pro spintroniku to může být problém.

Zředěné magnetické polovodiče

Diluted magnetic semiconductors.

Propojit součástky založené na spintronice a na elektronice.



Lanje, Sharma & Pode,
Functional Nanomaterial Synthesis and Characterization, 2014

Polovodič dopovaný
magnetickými atomy.

GaAs dopovaný Mn (některé
Ga atomy jsou nahrazeny Mn
atomy).

Aby materiál byl (fero)magnetický, nestačí, že obsahuje magnetické atomy.

Tyto magnetické atomy spolu musí interagovat tak silně, aby se jejich magnetické momenty **uspořádaly**.

🙄 V současné době jsou tyto materiály feromagnetické jen za **nízkých teplot**.

Hlavní naděje a problémy spintroniky

▶ Naděje:

- ▶ Nový mechanismus může vždy přinést něco nového (rychlejšího).
- ▶ “Nevolatilní” komponenty: zůstanou ve svém stavu **i po vypnutí elektřiny**.
- ▶ Menší **tepelné ztráty**: otočit elektron vzhůru nohama (změnit jeho spin) dá méně práce než jej někam přesunout.

▶ Problémy:

- ▶ Proudů nábojů lze snadno řídit (vnějším elektrickým polem), naproti tomu řídit proudy spinů je mnohem těžší.
- ▶ Mnohé druhy materiálů **dosud ve stadiu nadějnosti**.

Hlavní naděje a problémy spintroniky



▶ Naděje:

- ▶ Nový mechanismus může vždy přinést něco nového (rychlejšího).
- ▶ “Nevolatilní” komponenty: zůstanou ve svém stavu **i po vypnutí elektřiny**.
- ▶ Menší **tepelné ztráty**: otočit elektron vzhůru nohama (změnit jeho spin) dá méně práce než jej někam přesunout.

▶ Problémy:

- ▶ Proudů nábojů lze snadno řídit (vnějším elektrickým polem), naproti tomu řídit proudy spinů je mnohem těžší.
- ▶ Mnohé druhy materiálů **dosud ve stadiu nadějnosti**.