

Spintronika na terahertzových vlnách

CESTA ZA SNEM O RYCHLÉ ELEKTRONICE

Spintronika, věda o spinové elektronice, se stále častěji ohlíží po partnerovi z ultrarychlé branže. Bude ale manželství s terahertzovou spektroskopií z neobvyklého koutu elektromagnetického spektra šťastné a trvalé?¹

text **LUKÁŠ NÁDVORNÍK**

KDYŽ V ŘÍJNU 2021 startovala z mysu Cavanaugh sonda NASA Lucy a zahajovala svoji dlouhou cestu k Jupiterovým asteroidům, nesla na palubě nenápadnou spintronickou součástku s označením MRAM (z anglického Magnetic Random Access Memory) - paměť, která si právě odbývala svou kosmickou premiéru. Tyto magnetické RAM jsou na trhu necelé tři roky a představují nový koncept krátkodobého ukládání dat, který je energeticky úspornější, na rozdíl od konvenčních pamětí RAM se data nesmažou, když odpojíme napájení, a jsou řádově rychlejší, než je tomu u klasických flashek. Jde o zajímavý a praktický výstup spintronického výzkumu, který si získává pozornost nejen v exotických vesmírných programech, ale snad jej brzy najdeme i v běžnější nositelné elektronice nebo v internetu věcí.

Spintronika je věda o využití spinu, vnitřního magnetického momentu částic, pro záznam a zpracování dat, a rozvíjí tak typicky elektronické aplikace. Že nejde jen o akademický výzkum, dokázala už v devadesátých letech, kdy nastartovala revoluci v čtení dat uložených na magnetických pevných discích. Stál za ní v roce 1988 objev gigantické magnetorezistence (GMR) Alberta Ferty a plzeňského rodáka Petera Grünberga, za který dostali o devatenáct let později Nobelovu cenu. Tento jev vzniká ve dvojicích tenkých magnetických vrstviček (jako na obr. 1A), z nichž horní má orientaci

magnetizace pevnou a spodní můžeme přepnout. Například tím, že tento sendvič přiblížíme k místu, kde je na pevném disku zapsaný magnetický bit informace - volná vrstva se otočí podle jeho orientace. Pokud dvojitou vrstvou pustíme elektrický proud, jeho odpor bude záviset na relativním otočení magnetizace horní a spodní vrstvy. Rozdíl v elektrickém odporu může dosahovat až 100 %, což bylo do té doby pro magnetorezistenci, jak se obecně takové závislosti na magnetizaci říká, naprosto nepředstavitelné. To z gigantické magnetorezistence dělá mimořádně efektivní senzor pro záznamová zařízení. Proto také po nasazení této technologie v polovině devadesátých let zvýšily pevné disky dramaticky hustotu uložených dat a na trhu se začaly objevovat kapacity dosahující desítek gigabytů. A to byl konečnou důvod té Nobelovy ceny.

Dnešní kapacity disků běžně přesahují 10 terabytů a dva roky po vydání tohoto článku budou jistě opět dvojnásobné. Udržet takový exponenciální růst záznamové hustoty vyžaduje neustálý přísun nových technologií a konceptů. A opravdu: od zařízení prvních senzorů gigantické magnetorezistence přicházely co pět let jejich různé úpravy, od inženýrských vylepšení až po nové fyzikální alternace tohoto jevu.² Stále je ale většina digitálně uložených dat následně čtena obdobným fyzikálním mechanismem. Dokonce i nejmodernější

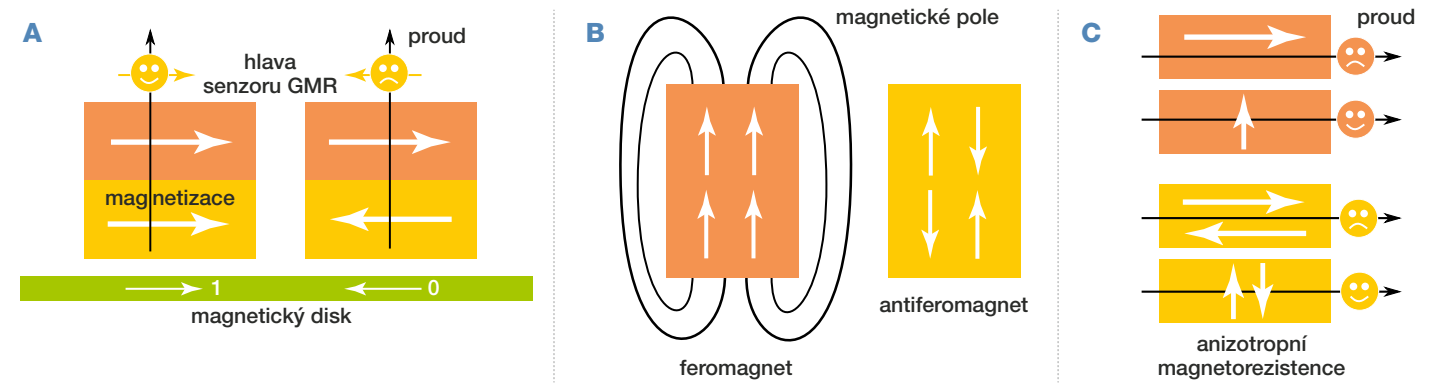
komerčně dostupné spintronické paměti, jako jsou zmiňované MRAM, využívají onen starý dobrý princip gigantické magnetorezistence.

MATERIÁLY DO AKCELERUJÍCÍ DOBY

Věrnost obdobnému fyzikálnímu mechanismu má smysl, neboť pro magnetický záznam dat využíváme stále stejný typ materiálu: feromagnetické kovy. V těchto látkách jsou magnetické momenty atomů vzájemně silně svázané³ a orientovány stejným směrem (obr. 1B). Pokud takové materiály zmagnetujeme v celém objemu, generují vnější magnetické pole, jaké známe z magnetů na lednici. Jelikož záznamové bity jsou miniaturní obdobou magnetů (rozměry magnetických zrn dosahují desítek nanometrů), můžeme je pomocí magnetického pole překlápět anebo detekovat pomocí spodní vrstvičky našeho GMR senzoru. Toto vnější pole magnetických bitů přináší také nevýhody - například omezuje jejich vzdálenost a velikost, aby se nezačaly vzájemně svými vlastními momenty ovlivňovat a přepínat. To je překážka v udržení trendu stále se zvyšující kapacity pevných disků.⁴

- 1) Pozn. red.: Pokud při čtení zjistíte potřebu podrobnějšího vysvětlení textu, doporučujeme přednášku na www.youtube.com/watch?v=a39naYdFLV8.
- 2) Jde hlavně o tunelovací obdobu gigantické magnetorezistence, kde se mezi dvě magnetické vrstvy vkládá tunelovací bariéra z nevodivého oxidu.
- 3) Popisuje několik, ale uveďme, že z kvantové mechaniky a principu nerozlišitelnosti částic vyplývá tzv. výměnná interakce, která nutí blízké atomy korelovat své magnetické momenty.
- 4) Překážek je víc, ale i triků, kterými disponují globální technologičtí výrobci. Zatím to vypadá, že během následujících let se můžeme dočkat kapacit až 100 TB.
- 5) Důvodem je to, že při přepnutí feromagnetu se změní celkový úhlový moment, který musíme v rámci zákonů zachování do systému dodat zvenčí. V případě antiferomagnetů žádná změna nenastává a proces může proběhnout mnohem rychleji.
- 6) Mluvíme pak o optických mezipásovéch přechodech, zatímco při excitaci elektrických proudů k nim nedochází. Proto opticky absorbují i látky, které nemají žádnou elektrickou vodivost - například keramika.

RNDr. LUKÁŠ NÁDVORNÍK, Ph.D., (*1986) získal doktorát na Matematicko-fyzikální fakultě UK a ve Fyzikálním ústavu Akademie věd. Během svého postdoktorského pobytu v Institutu Maxe Plancka a na Svobodné univerzitě v Berlíně získal zkušenosti s THz spektroskopií, kterou po návratu na MFF UK využívá v základním spintronickém výzkumu v nově založené laboratoři THz spintroniky.



1. SPINTRONICKÉ JEVY A MATERIÁLY. A. Princip gigantické magnetorezistence (GMR), kde elektrický proud protéká skrz dvojici shodně orientovaných magnetických vrstev snadněji než v případě vrstev orientovaných antiparalelně. Na tomto jevu jsou založeny senzory pro záznamová zařízení. **B.** Srovnání magnetického uspořádání a vnějšího magnetického pole feromagnetu a antiferomagnetu. **C.** Princip anizotropní magnetorezistence (AMR), kde obtížněji protéká elektrický proud ve směru orientace magnetických momentů feromagnetů nebo antiferomagnetů.

Jedno z možných dlouhodobých východisek k překonání tohoto problému je využití nových typů magnetických materiálů, jako jsou antiferomagnety. [1] Jak už je z názvu cítit, jde o látku, kde jsou blízcí atomární sousedé magneticky orientováni opačně, antiparalelně (obr. 1B). V takovém případě se magnetická pole každé dvojice atomů na dostatečně velké vzdálenosti vyruší a z vnějšího makroskopického pohledu má materiál nulové magnetické pole. Zároveň si ale uchovává vnitřní magnetické uspořádání, které lze využít k zápisu informace. Takový magnetický bit bez vnějšího pole by netrpěl výše zmíněnou limitací na hustotu integrace, a také by informace v antiferomagnetickém pevném disku nebyla citlivá na náhodné magnetické poruchy - umístění magnetu na disk by neznamenalo vymazání a ztrátu dat.

Popsaná zajímavá specifika antiferomagnetů však zároveň staví vědce před velkou výzvu: jak s těmito materiály jednoduše manipulovat? Významně do této otázky promluvili kolegové z týmu Tomáše Jungwirtha z Fyzikálního ústavu AV ČR (Vesmír 95, 628, 2016/11), kteří nedávno našli způsob, jak pomocí elektrického proudu jednoduše změnit magnetický stav antiferomagnetu se speciální symetrií. [2] Tento objev otevřel dveře vážně

míněným snahám o přenesení antiferomagnetického záznamu do reálných zařízení.

Čtení antiferomagnetického stavu se může zdát obdobně náročné. Podíváme-li se ještě jednou na obr. 1A, je vidět, že gigantická magnetorezistence, při níž odpor závisí na paralelní nebo antiparalelní konfiguraci magnetických momentů, zde nebude fungovat. Naštěstí existuje magnetorezistentní jev, který lze uplatnit i v antiferomagnetech. Anizotropní magnetorezistenci si můžeme představit jako obdobnou změnu odporu, která tentokrát závisí na úhlu mezi směrem elektrického proudu a magnetizace. Největší rozdíl nastává mezi nulovým a pravým úhlem, což lze s úspěchem využít pro detekci stavu feromagnetů i antiferomagnetů (obr. 1C).

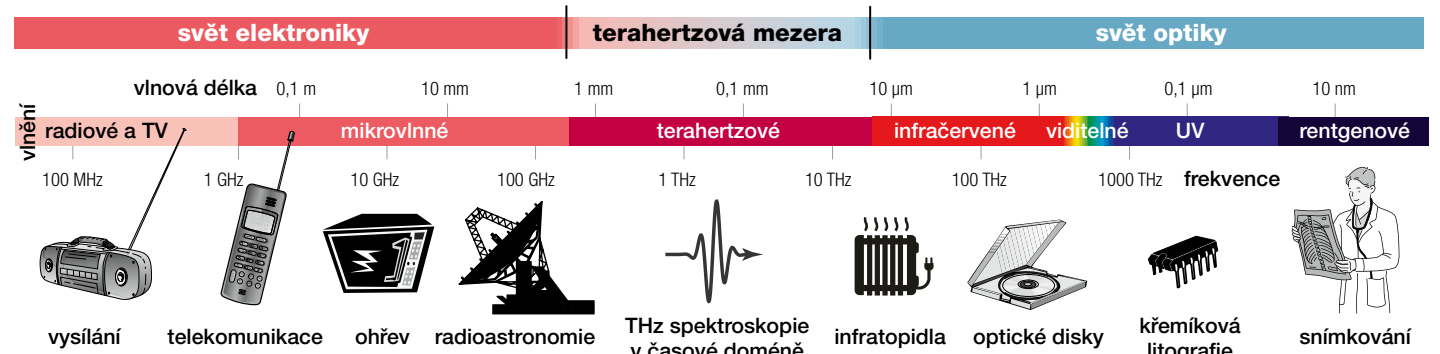
Existuje ovšem ještě jeden důvod, proč se na antiferomagnety na spintronickém poli upíná stále větší pozornost. Dokážou se totiž přepnout velice rychle. Alespoň teoreticky. Zatímco přepnutí orientace feromagnetu například o 90° jako na obr. 1C trvá řádově nanosekundy (mluvíme tedy o možných operačních frekvencích v řádu GHz), antiferomagnetický přechod mezi těmito stavy je o tři řády kratší, trvá pikosekundy.⁵ Součástky založené na takové třídě materiálů by mohly teoreticky pracovat na frekvencích

v oblasti terahertzů (THz) a přinést další revoluci v záznamových technologiích.

SVĚT MEZI ELEKTRIKOU A SVĚTLEM

Studium spintronických jevů a elektrických proudů v magnetických látkách na časových škálách pikosekund vyžaduje ovšem přibližně stokrát větší časové rozlišení, než současná elektronika nabízí (srovnáme s elektromagnetickým spektrem na obr. 2). Experimentátoři tedy často volí optický přístup a s úspěchem využívají moderní laserové systémy generující ultrakrátké (femtosekundové) optické pulzy. Například nedávno se kolegům ve skupině Petra Němce z Matematicko-fyzikální fakulty UK povedlo pomocí optické spektroskopie demonstrovat ultrarychlou detekci magnetického uspořádání antiferomagnetické vrstvy. [3] Nicméně obecně nejsou optické metody pro studium elektrických proudů v kovových a polovodivých materiálech vhodné, protože energie fotonů je na optických vlnových délkách již příliš vysoká.⁶

Vzniká tím jakési slepé místo: pro průzkum elektrických jevů jsou elektronické metody příliš pomalé a optické pulzy jsou tvořeny zářením o příliš vysoké frekvenci (typicky stovky THz; obr. 2). Tato terahertzová mezera, jak se v elektromagnetickém spektru říká intervalu frekvencí od 0,1 do 30 THz, dlouho rozdělávala laboratoře na vzájemně nekomunikující světy elektroniky a optiky, protože neexistovaly experimentální postupy, jak THz záření účinně generovat a měřit. Zlom přišel až relativně nedávno s rozvojem laserové techniky v průběhu devadesátých let a pro nově vzniklý obor se vžil název terahertzová spektroskopie v časové doméně.



2. ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM s hlavními oblastmi záření. Terahertzová spektroskopie v časové doméně vyplňuje dříve nepřístupné frekvence v tzv. terahertzové mezeře, tedy předěl mezi oblastmi pokrývanými elektronickými a optickými zdroji záření.

Jak tedy THz záření vytvořit? Představme si krátký optický pulz generovaný femtosekundovým laserem jako na **obr. 3A**. Například pro vlnovou délku 800 nm dosahuje frekvence optického záření 370 THz, během trvání pulzu tedy kmitne 50krát. Abychom vytvořili THz záření o frekvenci 50krát nižší, využijeme právě obálku tohoto pulzu. K tomu slouží opticky spínané THz antény nebo optické nelineární krystaly, například ZnTe, které obdobně jako anténa vyšlou elektromagnetické záření na frekvenci, s níž zakmitla obálka optického pulzu.⁷ Výsledné THz záření má opět podobu krátkého pulzu, obsahujícího typicky jediný zámek elektrického pole.

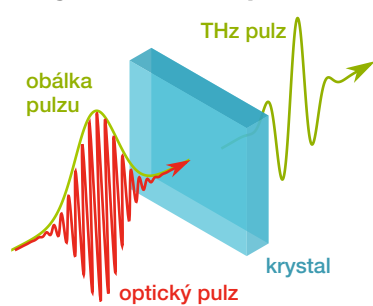
Měření THz pulzů je ještě zajímavější. Kmitnutí pole THz pulzu trvá například 1 pikosekundu, tedy mnohem déle, než optický pulz, který ho vytvořil. Pokud tedy oba pulzy vyšleme do dalšího optického krystalu společně (**obr. 3B**), ocitne se optický pulz v elektrickém poli THz pulzu, a to jej může změnit. Přesněji řečeno může stočit rovinu, v níž jeho pole kmitá, tzv. *rovinu polarizace*, což dokážeme snadno změřit. Postupnou změnou časového zpoždění obou pulzů můžeme „proskenuvat“ celý THz pulz a experimentálně přesně zrekonstruovat jeho průběh. Na rozdíl od optické spektroskopie, kde většinou měříme pouze intenzitu světla, zde dokážeme zpřístupnit samotné kmitající elektrické pole.

THz záření má tedy velmi neobvyklou povahu a přebírá typické vlastnosti z různých koutů elektromagnetického spektra. Vzniká v anténách podobně jako rádiové vlny, ale odráží se od zrcadel a lze jej zaostřit pomocí čoček jako světlo. Při interakci s látkou se podobá vysokofrekvenčnímu elektrickému napětí, ale detekovat jej musíme pomocí světelných pulzů. Volně prochází papírem, černým plastem nebo křemíkovou destičkou, ale neprojde lidskou rukou nebo zemskou atmosférou.

Tyto vlastnosti spolu s relativní jednoduchostí generování a přesného měření THz pulzů vedly v poslední dekádě k mnoha přímým aplikacím i mimo zdi laboratorí. Jelikož se terahertzové spektrální pásmo překrývá s energiemi vibrací a rotací mnoha molekul, vodu a vodní páry nevyjímaje, je ideálním detekčním nástrojem pro zobrazovací medicínu - například pro vyšetření nádorových tkání, které obsahují jiné množství vody než zdravé tkáně, nebo pro dentální medicínu. Velkou výhodou je zde fakt, že THz záření je tak nízkoenergetické, že nezpůsobuje žádné ionizující efekty jako v případě rentgenových vyšetření. Další uplatnění je v oblasti bezpečnosti, kontrol kvality, biologických detektorů nebo telekomunikace.

ULTRARYCHLÝ AMPÉRMETR
Není snad lepší příklad, na kterém lze ukázat vzájemnou prospěšnost THz spektroskopie

A generování THz pulzu

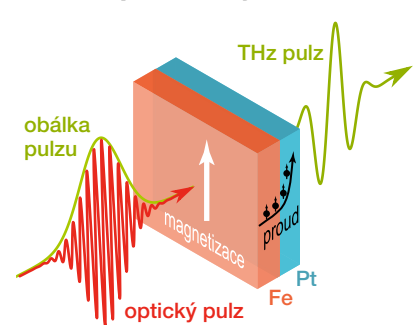


3. NELINEÁRNÍ OPTICKÉ KRYSYTY jsou podstatnou součástí generování (A) a detekce (B) THz pulzů. Při generování je obálka optického pulzu převedena na THz záření, zatímco během detekce se stáčí rovina polarizace prošlého optického pulzu v závislosti na časovém zpoždění mezi optickým a THz pulzem.

a spintroniky, než *spintronický THz emitör*. [4] Představme si obdobný experiment jako při generování THz pulzu uvedeném výše, ale tentokrát vyměníme optický krystal za dvojici kovových vrstev tenkých několik nanometrů (**obr. 4A**). Levá vrstva je feromagnetická, řekněme železo, pravou představuje těžký kov, například platina. Po dopadu ultrakrátkého optického pulzu se světelná energie v kovech absorbuje a dvojvrstvu vybudíme, čímž ustanovíme nerovnováhu. Protože jsou oba materiály vodivé, vytvoří se rychlý elektrický proud z železa do platiny, aby se vzorek vrátil zpět do rovnováhy. Protože je první vrstva magnetická, bude proud tvořen elektrony se spiny shodně orientovanými tak, jako je magnetizace železa.⁸ Tento proud není pouze elektrický (říkáme nábojový, tvořený pohybujícími se náboji elektronů), ale je také *spinový* - představuje totiž tok spinů nesený elektrony z jednoho místa na druhé. Jakmile takový spinový proud vstoupí do platiny, začnou se jeho nosiče stáčet kolmým směrem (na **obr. 4A** nahoru). Důvodem pro takovou defleksi je *spinový Hallův jev*, jeden z centrálních fenoménů moderní spintroniky. [1] Díky němu můžeme manipulovat se spinovými proudy - vychylovat je -, a tím je měřit a studovat.

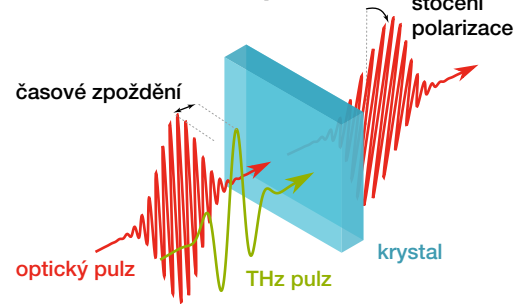
Jak vidíme na **obr. 4A**, vychýlený spinový a nábojový proud má nyní komponentu,

A THz spintronický emitör



4. EMISE THZ PULZU pomocí spinového proudu (vyznačen pomocí černých částic se spiny) tekoucího z vrstvy železa do platinové vrstvy, kde dochází k jeho vychýlení kvůli spinovému Hallovu jevu (A). Naopak propustnost THz pulzu přes tenkou vrstvu (B) je spojena s vodivostí vzorku ve směru polarizace. Otáčením magnetizace vlivem se AMR změní vodivost ve vertikálním směru, a tedy i amplituda prošlého pulzu.

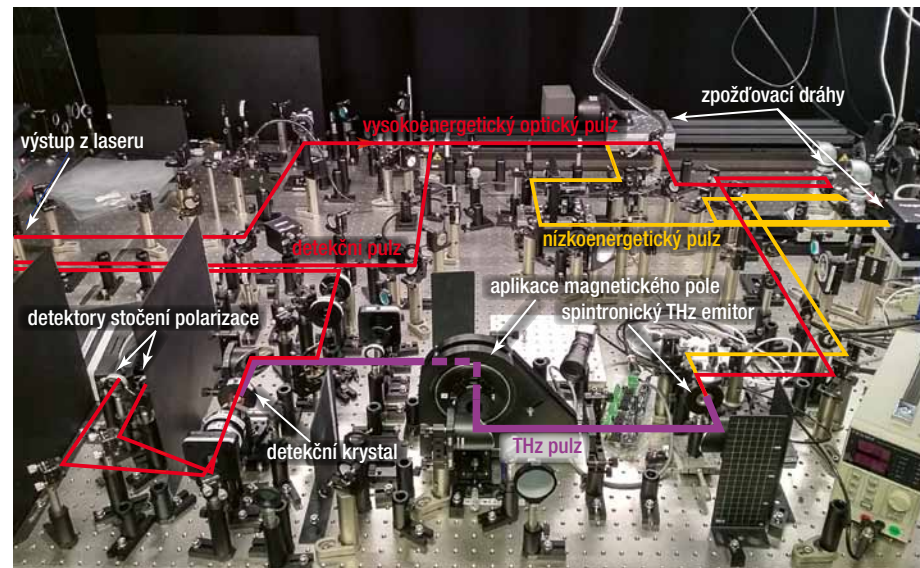
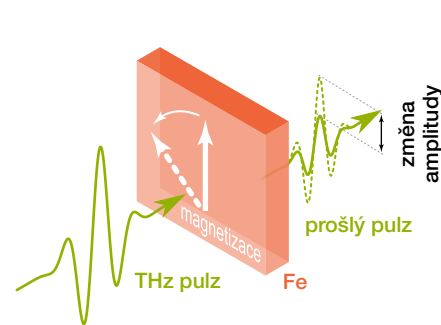
B detekování THz pulzu



kteřá leží v rovině vzorku. Tato na obrázku svislá složka elektrického proudu hraje roli antény emitující elektromagnetické záření. Jelikož je opět trvání optického pulzu „správně“ krátké, budou generované proudy obsahovat THz frekvence a dojde k emisi THz pulzu obdobně jako v příkladu s optickým krystalem. U konvenčních krystalů ale existuje jeden problém: některé THz frekvence totiž absorbují.⁹ Naproti tomu THz pulzy spintronicky emitované z kovových vrstev mohou být obdobně intenzivní, ale navíc pokrývají mnohem spoustěji celou frekvenční oblast - jsou tedy ideálním nástrojem pro širokospektrální THz experimenty.

Zmíněný experiment je ale také důležitý z fundamentálního pohledu: ukazuje totiž, že spinový Hallův jev lze stejně jako spinové proudy pozorovat i na THz frekvencích, tedy na časových škálách o řády kratších než těch dostupných v elektronických měřeních. Detekci a spektrální analýzou emitovaného THz pulzu lze dále studovat ultrarychlou povahu transportu, manipulace a interakce spinových proudů - THz spektroskopie se tedy chová jako „ultrarychlý ampérmetr“, který nepotřebuje elektrické kontakty a pracuje s pikosekundovým a kratším rozlišením. K otázkám, na které nám THz ampérmetr pomáhá odpovědět, patří také to, zda jsou různá rozhraní pro spinové proudy propustná, zda

B THz ohmmetr



5. TYPICKÝ PRALES optických komponent v uspořádání pro THz spektroskopii. Optický pulz (červená trasa) je po výstupu z laseru rozdělen na detekční a vysoko či nízkoenergetický generační svazek (červená nebo žlutá trasa podle energie), který je po časovém zpoždění na optických drahách zaostřen na spintronický emitör. Generované THz záření (fialová čára) je vedeno parabolickými zrcadly přes vzorek a fokusováno na detekční krystal, kam dopadá také optický detekční svazek. Stočení jeho roviny polarizace je měřeno dvojicí fotodetektorů a je zrekonstruován časový profil THz pulzu.

na nich nedochází k dodatečné defleksi¹⁰ nebo také, jaká je dynamika interakce spinů elektronů, které se ocitnou v blízkosti magnetizace další feromagnetické vrstvy.

Taková interakce je opět velmi užitečná už v dnešních aplikacích. Technologičtí giganti jako Samsung nebo Intel používají

spinové proudy vpuštěné do feromagnetické vrstvy k jejímu přepnutí - tedy zapsání jedničky či nuly v druhé generaci MRAM paměti s mnohem vyšší kapacitou. Pokud byste se chtěli setkat na vlastní kůži s takovou špičkovou technologií, která teprve nedávno opustila dveře laboratorí, můžete si pořídit chytré hodinky od Huawei,¹¹ které tyto paměti obsahují. Ty ovšem ještě nepracují na THz frekvencích. Na druhou stranu kolegové z týmu T. Jungwirtha a T. Kampfratha ze Svobodné univerzity v Berlíně dokázali pomocí THz pulzů přepnout stav antiferomagnetu [5], což otevírá cestu k THz zápisu a čtení spintronických pamětí.

JAK ULTRARYCHLE ČÍST?

Požadavek na takto rychlý zápis jde ruku v ruce s ultrarychlým čtením uložených dat v antiferomagnetech. Jak jsme viděli na **obr. 1C**, ideálním kandidátem je anizotropní magnetorezistence, kde opět detekujeme orientaci antiferomagnetu pomocí změny elektrického odporu. Můžeme využít THz spektroskopii také jako ultrarychlý ohmmetr?

Představme si, že máme vygenerovaný THz pulz, třeba pomocí spintronického emitöru. Obdobně jako u optického pulzu i v THz pulzu kmitá elektrické pole vždy v nějaké definované polarizační rovině. Pokud pulz projde tenkou kovovou vrstvou vzorku, obvykle se jeho amplituda sníží a změni se jeho tvar (**obr. 4B**). To je důsledkem vodivosti vzorku ve směru polarizace. Čím větší vodivost materiálu, tím větší absorpce a redukce amplitudy prošlého záření. Analýzou prošlého pulzu můžeme určit vodivost na frekvencích dopadajícího THz pulzu. Získáváme THz ohmmetr.

Totoho nástroje jsme využili s kolegy z týmu T. Kampfratha a sledovali THz vodivost ve směru polarizace THz pulzu a otáčeli s magnetizací feromagnetického materiálu. [6] Objevené změny v propustnosti jsou přímým důsledkem anizotropní magnetorezistence: největší propustnost byla, když magnetizace mířila stejným směrem jako polarizace, a nejmenší, když svíraly pravý úhel. Jde tedy o ukázkou toho, že THz čtení magnetických látek funguje a doplňuje skládačku nástrojů potřebných pro převedení spintronických pamětí do ultrarychlých časových škál. Zbývá tedy už „jenom“ spojit THz čtení i zápis do antiferomagnetů v jeden experiment a demonstrovat takovou úžasnou spintronickou aplikaci.

Alé samozřejmě nejde jen o aplikace. Anizotropní magnetorezistence je jenom jeden z řady spintronických jevů v magnetice uspořádaných látkách, které si žádají THz prozkoumání. Specifický spektrální obor THz spektroskopie umožňuje odlišit různé režimy spinových proudů¹² a nahlédnout do původu těchto jevů. Přechodem ke komplexnějším fenoménům nebo novým materiálům, jako jsou antiferomagnetny s magnetickými momenty orientovanými do trojúhelníků, máme šanci odhalit úplně nové fyzikální mechanismy. S těmito myšlenkami jsme s kolegy z týmu Petra Němce zakládali novou Laboratoř THz spintroniky na půdě Matematicko-fyzikální fakulty UK (THz uspořádání je na **obr. 5**), kde se chceme ultrarychlé spintronice nadále věnovat.

ŠTASTNÉ MANŽELSTVÍ

Zdá se, že spintronika a THz spektroskopie si mají vzájemně co nabídnout. Spintronika vnesla do THz technik nový způsob emise THz pulzů s dříve nevidaným spektrálním rozsahem. THz spektroskopie zase nabízí spintronickému výzkumu nástroje, jak zkoumat spinové proudy a zásadní spintronické jevy na ultrarychlých časových škálách, které by jinak zůstaly člověku uzavřeny. Toto manželství se tedy jeví šťastné a má krásnou budoucnost. A proto mě velmi těší, že jsem jim mohl jít za svědka. ●

K dalšímu čtení...

- [1] T. Jungwirth et al.: Nature Nanotech., 2016, DOI: 10.1038/nnano.2016.18.
- [2] P. Wadley et al.: Science, 2016, DOI: 10.1126/science.aab1031.
- [3] V. Saidl et al.: Nature Photonics, 2017, DOI: 10.1038/nphoton.2016.255.
- [4] T. Seifert et al.: Nature Photonics, 2016, DOI: 10.1038/nphoton.2016.91.
- [5] K. Olejník et al.: Sci. Adv., 2018, DOI: 10.1126/sciadv.aar3566.
- [6] L. Nádvořník et al.: Phys. Rev. X, 2021, DOI: 10.1103/PhysRevX.11.021030.