

Ultrarychlá spintronika s magnety, co nedrží na lednici

Lukáš Nádvorník, Eva Schmoranzarová, Petr Němec

Katedra chemické fyziky a optiky, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Ke Karlovu 3, Praha 2; lukas.nadvornik@matfyz.cuni.cz

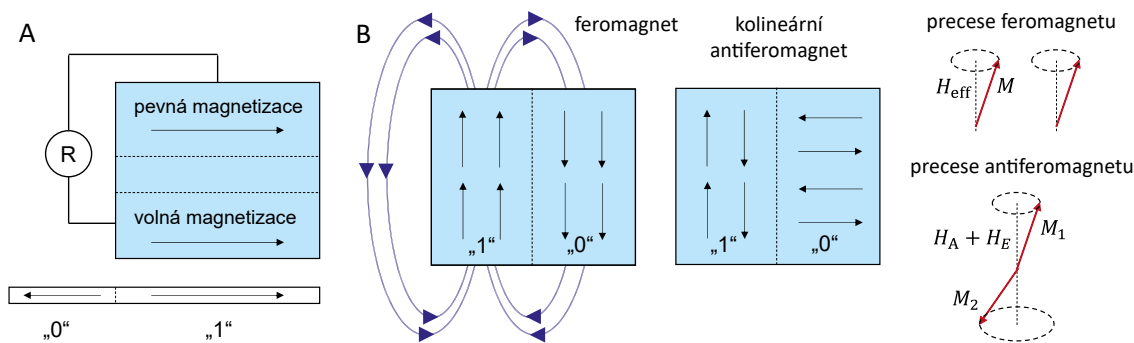
Kompenzované magnety jsou magnetické látky, v nichž jsou magnetické momenty atomů uspořádány tak, že se vzájemně kompenzují. Obdobně jako do konvenčních magnetů do nich lze zapisovat, ukládat a zpětně z nich vyčítat informaci, ale s teoreticky výrazně větší kapacitou a s o řády vyšší frekvencí. Snaha o ovládnutí takových ultrarychlých dynamik magnetického uspořádání je základním posláním optických, časově rozlišených experimentů, prováděných na těchto materiálech v Laboratoři optospintroniky.

Éra zettabytů a petawattodin

Od druhé poloviny 20. století zažívá informační technologie (IT) bezprecedentní rozmach, který zásadně proměnil způsob, jakým komunikujeme, ukládáme a zpracováváme informace. Objem přenesených i uložených dat dnes dosahuje zettabytových měřítek: podle analytické studie IDC společnosti Seagate bude v roce 2025 každoročně vytvořeno, zachyceno či zkopírováno přibližně 175 zettabytů ($1 \text{ ZB} = 10^{21} \text{ B} = 10^9 \text{ TB}$) digitálních dat, zatímco na přelomu milénia to bylo jen 60 petabytů ($1 \text{ PB} = 10^{15} \text{ B}$) a koncem osmdesátých let 2 terabyty, tedy obsah dnešního menšího pevného disku [1, 2]. Tento exponenciální růst však provází také stále větší energetické nároky. Jen samotná datová centra již nyní spotřebovávají více než 1–2% celosvětově vyprodukované elektriny a jejich podíl dále roste prudkým tempem okolo 20% ročně [3]. Odhady naznačují, že do roku 2030 může celý IT sektor zodpovídat až za 20% globální spotřeby elektrické energie, tedy přibližně 9 petawattodin ročně [2] – což odpovídá zhruba dvoutisícnásobku roční výroby jaderné elektrárny Temelín.

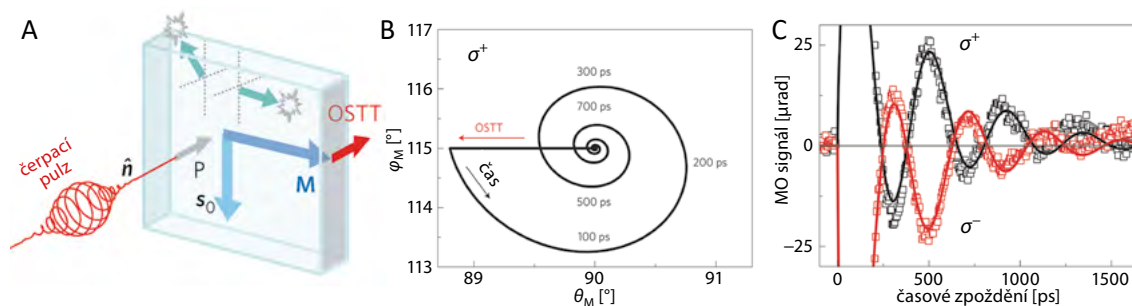
Udržet další rozvoj v této „zettabytové éře“ proto vyžaduje hledání nových, vysoce účinných konceptů zpracování a ukládání informace. Jednou z perspektivních cest je spintronika, obor elektroniky a základního výzkumu, který využívá nejen náboj, ale i spin elektronu, a nabízí potenciál pro zásadní snížení energetické náročnosti výpočetních a paměťových technologií [4].

Spintronika založená na feromagnetických záznamových materiálech (látkách s magneticky uspořádanými momenty a nenulovým celkovým momentem) skutečně dokázala několikrát v historii vývoj IT a záznamových technologií revolucionizovat. Příkladem může být objev a aplikace gigantické a tunelovací magnetorezistence k efektivnímu vyčítání dat uložených na feromagnetických discích, která v prvním desetiletí tohoto století umožnila přechod k terabytovým pevným diskům (princip vysvětlen na obr. 1A) [5]. Další významnou spintronicou součástí může být nedávno vyvinutá magnetická RAM paměť, která nabízí rychlé a energeticky úsporné ukládání dat do bitů podobajících se GMR senzoru. Tento koncept nalézá uplat-



Obr. 1 Feromagnety vs. antiferomagnety. Panel A: Ukázka využití gigantické magnetorezistence (GMR) ve čtecí hlavě pevných disků. Informace v podobě „0“ a „1“ je zapsána do feromagnetických domén na disku, nad nímž se ve vzdálenosti 5–15 nm pohybuje GMR senzor. Ten se skládá z feromagnetické vrstvy s pevně orientovanou magnetizací (nahore), spaceru a další feromagnetické vrstvy (dole), jejíž magnetizace se vlivem magnetické interakce orientuje podle domény na disku pod ním. Elektrický odpor celé *sandwich* se mění až o 100% podle vzájemné orientace magnetizací obou vrstev. Panel B vlevo: Příklad zápisu logické „1“ a „0“ do feromagnetu a kolineárního antiferomagnetu. Křivky naznačují vnější magnetické pole feromagnetického bitu, jenž může paraziticky interagovat s vedlejším bitem a limitovat velikost domén a hustotu zápisu. Ukládání dat do antiferomagnetu těmito jevy netrpí. Panel B vpravo: Ukázka koherentní precese feromagnetických a antiferomagnetických momentů okolo efektivního magnetického pole. V případě feromagnetů zůstávají momenty paralelní, zatímco u antiferomagnetů jsou spiny obou podmříží vůči sobě skloněny, což do procesu zahrnuje také intenzivní výměnnou interakci a vede k řádově vyšším precesním frekvencím.





Obr. 2 Časově rozlišené měření feromagnetické precese. Panel A: Absorpce kruhově polarizovaného femtosekundového laserového pulzu vytvoří spinově polarizované elektrony, jejichž spin (s_0) vlivem precese okolo magnetizace (M) míří ve směru roviny vzorku. Magnetický moment s_0 pak analogicky působí i na M a indukuje tak optický spinový krut, který vykloní magnetizaci mimo rovnovážný směr (easy axis). Projekce magnetizace kolmá na rovinu vzorku je pak detekována lineárně polarizovaným detekčním pulzem jako úhel stočení jeho polarizace. Panel B: Vypočítaná precese M po vyklonění z easy axis jako funkce úhlu v rovině vzorku (φ_M) a úhlu ke kolmici k rovině (θ_M). Panel C: Změřený magnetooptický signál jako funkce časového zpoždění mezi excitačním a detekčním pulzem ve vzorku GaMnAs při nízké teplotě pro dvě helicity kruhové polarizace excitace. Obrázky z publikace [9]

nění ve speciálnějších aplikacích, jako je kosmonautika nebo internet věcí, v běžném laptopu se ho nejspíš nedočkáme. Zůstává tedy otázka, jaký další trend ve spintronice by mohl pomoci vyřešit nároky soudobého IT.

Feromagnetické komplikace

Jakkoli jsou feromagnetické látky nebývale užitečné magnetické látky, jejich makroskopický magnetický moment je současně výhodou i nevýhodou. Pomocí něho lze snadno s magnetickou doménou manipulovat externím magnetickým polem a informaci zapsat, ale zároveň tyto vnější magnetické momenty jednotlivých bitů v záznamovém médiu interagují (obr. 1B). Požadavek na vyšší hustoty zapsané informace znamená klesající vzdálenost mezi bity a větší vzájemné ovlivňování a nestability (tzv. *crossstalk*), což představuje jeden z limitujících faktorů vyšší integrace [6, 7, 8].

Obdobně je nenulový vnější moment překážkou na cestě za rychlejšími zápisy informace, než je gigahertzový standard současné elektroniky (např. RAM a MRAM paměti dosahují zapisovacích cyklů v řádu nanosekund). Pro studium takových subnanosekundových manipulací je nutné opustit teritorium elektronických technik a zařadit ultrarychlé optické a terahertzové metody. Excitací ultrakrátkým laserovým pulzem o typické délce 100 fs s přesně určenou kruhovou či lineární polarizací lze spustit dynamiku magnetizace a potenciálně docílit i jejího překlolení. Takové rychlé efekty neteplné povahy, spojené s přímou injekcí spinového momentu do materiálu nebo redistribucí jeho spinově polarizovaných nosičů, jsme v rámci naší skupiny v minulém dekadě objevili ve zředěném feromagnetickém polovodiči GaMnAs [9, 10].

Příklad dynamiky magnetizace po excitaci tenké vrstvy GaMnAs kruhově polarizovaným laserovým pulzem při teplotě 35 K můžeme vidět na obr. 2. Absorpce takového optického pulzu vede k injekci spinově polarizovaných fotonosičů, které začnou okamžitě působit svým magnetickým momentem na magnetizaci a vychýlí ji z rovnovážné polohy podél snadné osy (schéma na panelu A). Jakmile se magnetizace ocitne mimo snadnou osu, začne se do jejího směru vracet precesním pohybem kolem ní (panel B). Projekce této trajektorie magnetizace do normály k ploše vzorku je měřitelná pomocí magnetooptického Faradayova jevu. Výsledný magnetooptický signál má tedy povahu tlumené oscilující křivky (panel C), jejíž polarita (počáteční fáze) je určena směrem kruhové polarizace, a tedy i směrem in-

jektovaných spinů. Efekt dostal do češtiny obtížné přeložitelné pojmenování *optical spin transfer torque*.

Tento experiment mimo jiné dobře demonstruje, že přestože byla použita technika se subpikosekundovým časovým rozlišením, naměřená dynamika magnetizace zůstává v řádu nanosekund, tj. gigahertzových frekvencí. Jak je ukázáno na obr. 2B a C, perioda oscilací magnetizace je v GaMnAs přibližně 400 ps, což odpovídá frekvenci 2,5 GHz. To je dáno fundamentální limitací feromagnetických materiálů, jejichž momenty jsou organizovány paralelně (srovnej obr. 1B). Frekvence precese f_{FM} zde může být aproximována jednoduchým vztahem [6]

$$f_{FM} \approx \frac{\gamma}{2\pi} H_{eff},$$

kde $\gamma/(2\pi) \sim 20$ GHz/T je gyroskopický poměr a H_{eff} je efektivní magnetické pole, které magnetizace „cítí“. To se skládá z vnějších polí, ale také efektivních magnetických polí anizotropie materiálu nebo tvaru vzorku. Bez aplikace vnějšího magnetického pole nabývá typicky H_{eff} hodnot desetin tesla, což vede k f_{FM} v řádu jednotek nebo desítek GHz. Pro získání výrazně rychlejších dynamik a potenciálního přepínání magnetizace (a tedy k zápisu informace) by bylo nutné aplikovat velmi vysoké, v praxi a aplikacích nedosažitelné magnetické pole.

Na cestě ke kompenzovaným magnetům

Teoreticky slibné řešení těchto dvou fundamentálních limitací feromagnetických materiálů – nenulového vnějšího momentu bránícího vysoké integraci a paralelního uspořádání limitujícího dynamiku – mohou nabízet kompenzované magnety. V těchto systémech jsou magnetické momenty jednotlivých magnetických atomů orientovány tak, že se v rámci základní magnetické buňky kompenzují. Příkladem takové kompenzace může být například antiparalelní uspořádání kolineárních antiferomagnetů (schéma na obr. 1B). V takovém případě odpadá nejen problém s *crosstalky*, ale také se zpřístupňují o řády vyšší dynamiky magnetického uspořádání.

Pokud jsou antiparalelní spiny magnetických podmřížek excitací vyvedeny mimo rovnovážný směr snadné osy, začne proces precese stejně jako u feromagnetů. Významným rozdílem je směr precese: pro obě polarity spinů je opačný, což momenty vyklání z jejich vzájemné antiparalelity. Proti takovému vychýlení ovšem začne působit výměnná interakce, která prostřednictvím efektivního magnetického pole H_E udržuje antiparalelní uspořádání antiferomagnetu. Obvykle je H_E o řády vyšší než typická pole anizotropie H_A a dosahuje tisíců



tesel. Souhra mezi těmito poli vede k antiferomagnetické rezonanční frekvenci, kterou v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole aproximuje vztah [6]

$$f_{\text{AFM}} \approx \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{2H_E H_A}$$

V závislosti na velikosti magnetických anizotropií tedy může dynamika v antiferomagnetech dosahovat terahertzového frekvenčního pásma a subpikosekundové časové škály.

Tyto zjevné výhody kompenzovaných magnetů jsou vykoupěny obtížnou manipulací s magnetickým pořádkem. Nulový celkový moment a netečnost těchto materiálů k vnějšímu magnetickému poli předurčuje, že potenciální zápis do kompenzovaného média musí probíhat jinak – chytřeji –, a to obvykle pomocí elektrických proudů nebo optickými laserovými pulzy. „Chytřejší“ metody zápisu se také ukázaly být energeticky výhodnější a typicky na vyšších operačních frekvencích [8].

Přepínání antiferomagnetu CuMnAs

Prvním kompenzovaným materiálem, kterým se naše skupina začala intenzivně zabývat, je antiferomagnetický polokov CuMnAs (krystalická struktura je zobrazena na obr. 3A). S kritickou teplotou uspořádání okolo 480 K, dobrou integrovatelností s polovodičovými substráty a především efektivními způsoby zápisu informace je zajímavým médiem splňujícím mnohá aplikační kritéria [11].

Obrázek 3A schematicky znázorňuje princip manipulace s magnetickými momenty pomocí elektrického proudu. Díky speciální symetrii krystalu působí tok elektronů rovnoběžný s orientací magnetických momentů spintronický krut (*Néel spin-orbit torque*), který ústí v reorientaci momentů kolmo na proud [12]. Změnou orientace proudu o 90° potom přepneme antiferomagnet zpět do původní orientace. Zapsaný stav lze dobře detekovat druhým elektrickým pulzem pomocí magnetorezistivních jevů, které na reorientaci magnetizace vůči směru detekčního proudu reagují změnou elektrického odporu. Z toho důvodu se pro zápis i čtení používají litograficky připravené součástky ve tvaru kříže.

Příklad cyklického elektronického přepínání takové součástky z CuMnAs je zobrazen na obr. 3B. Šedé a bílé oblasti na pozadí grafu představují zapisování pomocí elektrických pulzů orientovaných ve vzájemně kolmých

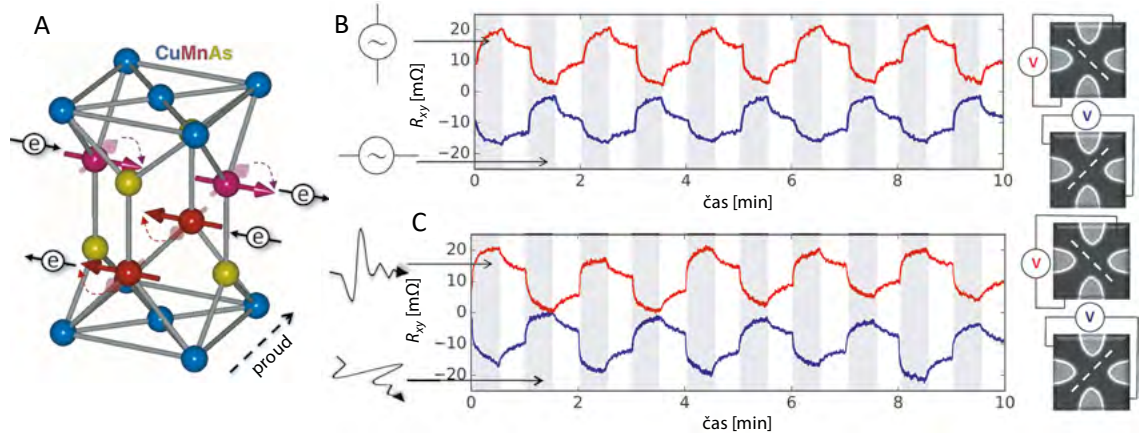
směrech, zatímco červená a modrá křivka je odpor detekovaný ve dvou kolmých směrech čtecího proudu. Významným krokem k potenciálně ultrarychlým zápisům byla demonstrace zápisu do těchto struktur pomocí pikosekundových pulzů terahertzového (THz) záření. To interaguje s materiálem velmi obdobně jako konvenční vysokofrekvenční proudové zdroje, nicméně bez nutnosti elektrických kontaktů a na frekvenční škále, která je pro elektroniku nedosažitelná. Jak dokládá obr. 3C, absorpcí takových mimořádně krátkých pulzů lze docílit stejného profilu přepínání [13].

Nicméně samotný zápis velmi krátkými pulzy pro ultrarychlou funkcionalitu paměťové součástky nestačí. V citovaných experimentech bylo vyčítání prováděno elektronicky, což limitovalo možné časové rozlišení prakticky na mikrosekundy, limitně pak do řádu nanosekund. Mnohem vyšší časové rozlišení mohou nabídnout opět optické metody. Jejich ukázkou můžeme vidět na obr. 4. Zde jsme využili optický analog elektronických magnetorezistivních jevů – magnetický lineární dichroismus – k první ultrarychlé detekci magnetického uspořádání v CuMnAs [14]. Tento jev se projevuje stočením lineární polarizace detekčního ultrakrátkého laserového pulzu úměrně k velikosti antiferomagnetických momentů (panel A). Prvotní excitací materiálu silným laserovým pulzem lze způsobit ultrarychlou demagnetizaci – přechodnou ztrátu magnetického uspořádání vlivem excitace elektronů, jejíž časový průběh můžeme sledovat změnou zpoždění excitačního a detekčního pulzu (panely B a C). Postupným ohříváním vzorku a tím vyvolanou ztrátou magnetooptického signálu nad kritickou teplotou antiferomagnetu pak bylo možné dokázat původ měřených jevů v antiferomagnetickém uspořádání (panel D).

Kombinací ultrarychlého zápisu a vyčítání se nyní otevírá možnost studia samotné dynamiky přepínání a určení jeho časových konstant. Tento výzkum v naší skupině aktuálně probíhá.

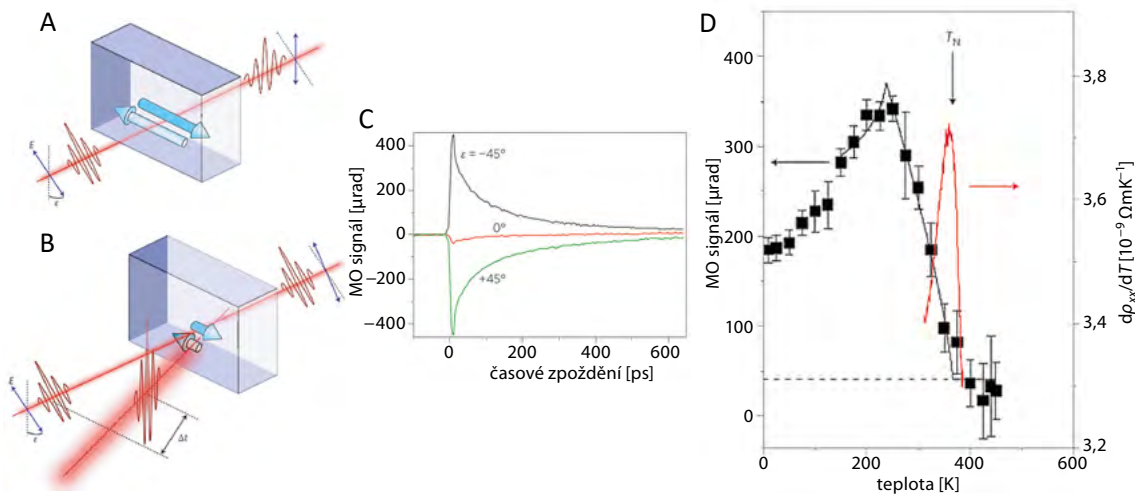
Nanofragmentace antiferomagnetických domén v CuMnAs

Dosavadní příklady manipulace s antiferomagnetem se zaměřovaly na reorientaci magnetických momentů, díky níž lze informaci uložit a vyčíst. Další možnost ukládání je pomocí změny doménové struktury mag-



Obr. 3 Přepínání antiferomagnetu CuMnAs. Panel A: Krystalická struktura CuMnAs s antiparalelními spiny obou podmříží atomů Mn (světle červené šipky). Po aplikaci elektrického proudu (černá čárkovaná šipka dole) dojde k aplikaci lokálního krutu spinu elektronů (černé šipky u koleček s „e“) s opačnou polaritou na obě spinové podmříže, což v antiferomagnetu „přepne“ směr momentů do směru kolmého na proud. Panel B: Střídavá aplikace elektrických proudů pomocí elektronického zdroje (šedé oblasti, směr proudu se střídavě mění o 90°) a následná relaxace (bílé oblasti). Vyčítání je opět elektrické ve dvou na sebe kolmých orientacích (červená a modrá křivka). Panel C: Stejný experiment s využitím absorpce pulzů THz záření namísto elektrických pulzů z proudového zdroje. Směr elektrického proudu je nyní určován střídavě se měnícím směrem polarizace THz pulzů. *Obrázky z publikace [13]*





Obr. 4 Ultrarychlá detekce magnetického stavu antiferomagnetu CuMnAs. Panel A: Lineární polarizace detekčního pulzu se vlivem interakce se vzorkem stočí o určitý úhel, což je způsobeno jednak interakcí s antiferomagnetickými momenty, ale také substrátem nebo okénky kryostatů. Panel B: Vlivem excitace silným laserovým pulzem dojde k ultrarychlé demagnetizaci antiferomagnetu. Toto zmenšení magnetických momentů se propíše do zmenšení úhlu stočení polarizace detekčního pulzu. Protože všechny ostatní příčiny stočení polarizace v experimentu se nezmění, je možné je vzájemně oddělit. Panel C: Příklad magnetooptického signálu demagnetizace jako funkce časového zpoždění excitačních a detekčních pulzů pro různé polarizace detekčního pulzu. Panel D: Změna magnetooptického signálu jako funkce teploty (černé body) v porovnání s derivací elektrické rezistivity materiálu (červená křivka). Obě křivky naznačují kritickou teplotu magnetického uspořádání T_N okolo 400 K. Obrázky z publikace [14]

netu. Domény jsou oblasti, kde je magnetické uspořádání orientované jedním směrem, oddělené doménovou stěnou, přechodovou oblastí obvykle s vyšším elektrickým odporem, než má vnitřek domény (domény jsou naznačeny jako bílé a černé oblasti na obr. 5A). Efektivní zápis informace do změny antiferomagnetické doménové struktury, který byl v naší skupině nedávno proveden pomocí optické excitace ultrakrátkými laserovými pulzy [15, 16, 17], vykazuje klíčové chování analogových, neuromorfních pamětí.

Po absorpci ultrakrátkého optického pulzu dojde k prudkému, přechodnému nárůstu teploty tenké vrstvy antiferomagnetu. Pokud při ohřevu nebylo dosaženo prahové teploty, teplo během stovek pikosekund disipuje do substrátu, který díky svému mnohem většímu objemu představuje tepelný rezervoár. Během přechodně navýšené teploty dochází také k nárůstu elektrického odporu. V případě, že prahové teploty dosaženo bylo – a to lze docílit zvýšením fluence laserové excitace anebo absorpcí dalšího pulzu dříve, než bylo všechno teplo z CuMnAs disipováno (panel B) –, doménová struktura se rozmělní do výrazně menších domén. Tento proces nese označení *nanofragmentace* a jeho pravděpodobnou fyzikální podstatou je ohnutí systému nad kritickou teplotu magnetického uspořádání a poté jeho velmi rychlé ochlazení, během něhož se nestihnou zformovat větší rovnovážné domény [15, 16, 18]. Jelikož se procesem nanofragmentace dramaticky zvýší počet doménových stěn, dojde také k měřitelnému nárůstu elektrického odporu. Po excitaci nanofragmentovaný stav relaxuje do rovnovážné velikosti (a počtu) domén s časovou konstantou přibližně exponenciálně závislou na rovnovážné teplotě materiálu. Tato excitace tedy dosahuje hodnot od milisekund (pro teplotu paměťového elementu rovnou vyšším desítkám °C) přes jednotky sekund (pokojová teplota) až po hodiny (230 K) a prakticky trvalý zápis při nižších kryogenních teplotách [14].

Kombinace rychlé časové konstanty popisující chladnutí vrstvy tohoto antiferomagnetu a dlouhé konstanty popisující jeho magnetickou relaxaci zpět do rovnovážné doménové struktury vede k tomu, že je možné na ten-

to antiferomagnet nahlížet jako na analogovou paměť s neuromorfními prvky. Stejně jako biologické neurony i excitovaný CuMnAs obsahuje funkcionalitu *leakage sum* (sčítání s relaxací) a *firing threshold* (prahová hodnota pro akci). Námi provedené zmapování komplexní relaxace excitovaného CuMnAs v čase přes deset řádů (od nanosekund po desítky sekund) je ukázáno na obr. 5C.

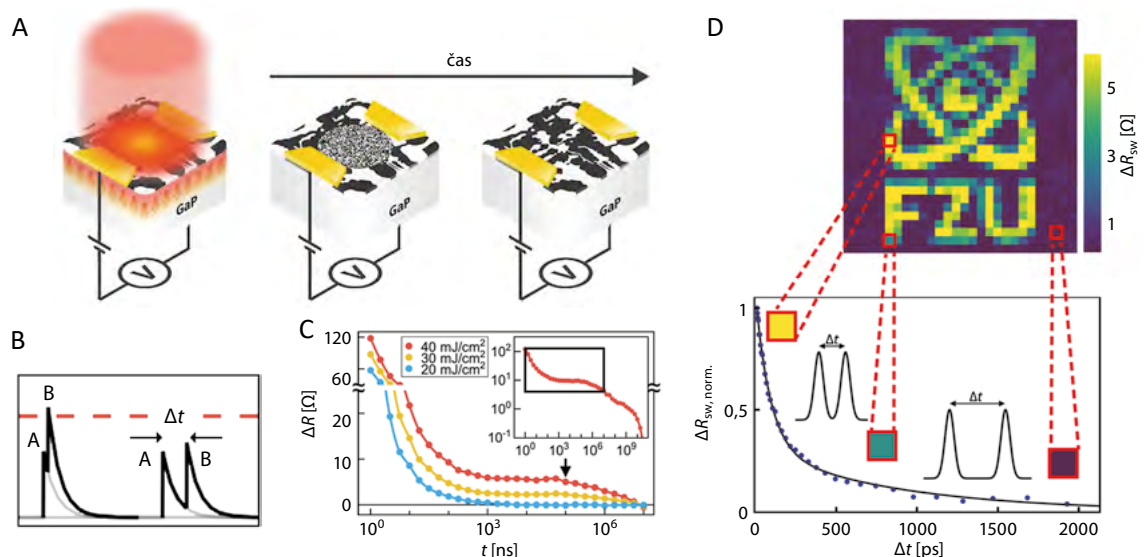
Díky sčítání zahřívání od dvou po sobě jdoucích, různě časově zpožděných optických pulzů lze dosáhnout různé úrovně nanofragmentace, a tedy i různých změn elektrického odporu. Obrázek 5D představuje ukázkou, jak jsme pomocí této techniky (tzv. *temporal latency coding*) zakódovali v paměťové součástce 256 úrovní šedi obrázku loga Fyzikálního ústavu AV ČR do sub-nanosekundového časového zpoždění dvou femtosekundových pulzů. Zde tato informace zůstala uložena po dobu několika milisekund a následně byla elektricky vyčtena a obraz byl zrekonstruován.

Neuromorfní povaha analogového zápisu do CuMnAs není jen kombinací výpočetní a paměťové funkcionality, ale je významná i pro imperativ snižování energetické náročnosti IT průmyslu, jak bylo předesláno v úvodu článku. Pro úkoly, kde není vyžadována vysoká přesnost, ale podstatná je paralelita a efektivita, bývají neuromorfní systémy energeticky výrazně méně náročné než precizní synchronní digitální algoritmy [16].

Dále za obzor konvenčních antiferomagnetů

Přepínání antiferomagnetu CuMnAs pomocí zmíněného spintronického krutu nebo vyčítání orientace antiparalelních spinů pomocí magnetorezistence nebo magnetooptiky jsou příklady relativistických efektů, tedy jevů závislých na spin-orbitální interakci. Ta představuje v pevných látkách pouze malou poruchu a tyto jevy bývají poměrně slabé – jedná se o změnu detekovatelných signálů v řádu procent. Naproti tomu ve feromagnetech jsou pozorované jevy, jako je gigantická magnetorezistence zmíněná v úvodu článku, kde se elektrické vlastnosti mění i o více než 100%. Nabízí se tedy otázka, zda lze spojit výhody obou světů, feromagnetů i antiferomagnetů.





Obr. 5 Paměťová součástka založená na nanofragmentaci magnetické struktury antiferomagnetu CuMnAs. Panel A: Princip nanofragmentace. Nejprve jsou magnetické domény neporušené a celistvé. Vlivem absorpcie ultrakrátkého laserového pulzu dojde k dočasnému ohřátí části vzorku nad kritickou teplotu magnetického uspořádání, což způsobí jeho demagnetizaci. Při prudkém poklesu teploty dochází k opětovné remagnetizaci ve formě nanofragmentovaných domén. Z důvodu vysokého nárůstu množství doménových stěn pozorujeme přechodné zvýšení elektrického odporu paměťové součástky. Při dalším chlazení relaxují domény do původního stavu. Panel B: Sčítání dvou po sobě jdoucích excitačních laserových pulzů A a B, kdy po každém z nich dochází k exponenciální relaxaci zvýšené teploty vlivem odvodu tepla z krystalu – toto připomíná neuromorfni funkci *leakage sum*. Dojde-li po součtu k překročení prahové hodnoty teploty (červená čárkovaná čára), spustí se nanofragmentace, která zapíše informaci do změny odporu, jež zde zůstává na mnohem delších časových škálách – analogicky k neuromorfni funkci *firing threshold*. Panel C: Ukázka námi naměřené relaxace odporu paměťové součástky v čase přes 10 řádů. Odvod tepla ze součástky probíhá do cca jednotek nanosekund, delší relaxační profil je z důvodu relaxace nanofragmentace. Panel D: Zápis informace (obrázku loga FZU o 256 úrovní šedi) do jediného bitu CuMnAs pomocí změny zpoždění mezi pulzy A a B, Δt – metoda temporal latency coding. *Obrázky z publikací [16] a [17]*

Nedávným návrhem na takovou synergii výhod různých „typů“ magnetismu je koncept altermagnetismu [19]. Altermagnet je magneticky uspořádaná, kompenzovaná látka, která se na první pohled blíží konvenčním kolineárním antiferomagnetům. Rozdílem ovšem je, že atomární okolí opačně orientovaných spinů je odlišné a spiny spojuje nikoli operace inverze, jako u antiferomagnetů, ale rotace o určitý úhel, například o 90° . To vede k opačně spinově rozštěpené pásové struktuře pro tyto úhly a indukuje neobvyklé chování, kdy ve významných směrech vykazuje látka efekty analogické k mnoha jevům známým z feromagnetů, například období gigantické magnetorezistence či spinové polarizace elektrického proudu.

Dalším velice zajímavým kompenzovaným systémem jsou nekolineární antiferomagnet, kde jsou magnetické momenty také plně makroskopicky kompenzovány, ale uspořádány jsou jinak než antiparalelně, například trojice spinů tvoří trojúhelník nebo hvězdičky. I v takových systémech jsou teoreticky předpovězeny jevy obdobné těm z feromagnetické spintroniky.

Optické a terahertzové časově rozlišené experimenty na obou těchto nekonvenčních třídách magnetů jsou nyní hlavním vědeckým zaměřením naší Laboratoře optospintroniky na Katedře chemické fyziky a optiky.

Literatura

- [1] D. Reinsel, J. Gantz, J. Rydning: *IDC White Paper Data Age 2025*. Seagate Technology, 2025.
- [2] N. Jones: How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature* **561**, 163 (2018).
- [3] *Energy and AI*. International Energy Agency IEA, 2025, kap. 3. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>.
- [4] A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani et al.: Review on spintronics: Principles and device applications. *J. Magnetism and Magnetic Materials* **509**, 166711 (2020).
- [5] S. Kasap, P. Capper (Eds.): *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Springer International Publishing, Cham 2017.
- [6] V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi et al.: Antiferromagnetic spintronics. *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015005 (2018).
- [7] T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley et al.: Antiferromagnetic spintronics. *Nature Nanotech.* **11**, 231 (2016).
- [8] M. B. Jungfleisch, W. Zhang, A. Hoffmann: Perspectives of antiferromagnetic spintronics. *Phys. Lett. A* **382**, 865 (2018).
- [9] P. Němec et al.: Experimental observation of the optical spin transfer torque. *Nature Phys.* **8**, 411 (2012).
- [10] N. Tesařová et al.: Experimental observation of the optical spin-orbit torque. *Nature Photon.* **7**, 492 (2013).
- [11] K. Olejník et al.: Antiferromagnetic CuMnAs multi-level memory cell with microelectronic compatibility. *Nat. Commun.* **8**, 15434 (2017).
- [12] J. Železný, H. Gao, K. Výborný et al.: Relativistic Néel-Order Fields Induced by Electrical Current in Antiferromagnets. *Phys. Rev. Lett.* **113**, 157201 (2014).
- [13] K. Olejník et al.: Terahertz electrical writing speed in an antiferromagnetic memory. *Sci. Adv.* **4**, eaar3566 (2018).
- [14] V. Saidl et al.: Optical determination of the Néel vector in a CuMnAs thin-film antiferromagnet. *Nature Photon.* **11**, 91 (2017).
- [15] Z. Kašpar et al.: Quenching of an antiferromagnet into high resistivity states using electrical or ultrashort optical pulses. *Nat. Electron.* **4**, 30 (2020).
- [16] M. Surýnek et al.: Picosecond transfer from short-term to long-term memory in analog antiferromagnetic memory device. *Newton* **1**, 100034 (2025).
- [17] J. Zubáč et al.: Investigation of Opto-magnetic Memory Effects in Antiferromagnetic CuMnAs Using Ultrafast Heat Dynamics and Quench Switching. *Adv. Elect. Materials* **11**, 2400835 (2025).
- [18] M. Surýnek, V. Saidl, Z. Kašpar et al.: Investigation of magnetic anisotropy and heat dissipation in thin films of compensated antiferromagnet CuMnAs by pump-probe experiment. *J. Appl. Phys.* **127**, 233904 (2020).
- [19] L. Šmejkal, J. Sinova, T. Jungwirth: Beyond Conventional Ferromagnetism and Antiferromagnetism: A Phase with Nonrelativistic Spin and Crystal Rotation Symmetry. *Phys. Rev. X* **12**, 031042 (2022).

