



Kraków, 14 grudnia 2022

Rentgenowski krok ku superszybkiej nanoelektronice

Gdy zbudowany z odpowiednio dobranych warstw materiałów o własnościach magnetycznych zostanie oświetlony impulsem z lasera rentgenowskiego, błyskawicznie się demagnetyzuje. Zjawisko, dotychczas słabo poznane, w przyszłości można byłoby wykorzystać w nanoelektronice, na przykład do budowy ultraszybkich przełączników magnetycznych. Ważnym krokiem ku temu celowi jest nowe narzędzie, opracowane przez polsko-niemiecko-włoski zespół naukowców w ramach wspólnego projektu badawczego European XFEL i IFJ PAN.

Żadne urządzenie przetwarzające informację nie może pracować z szybkością większą niż ta, z jaką zachodzą zjawiska fizyczne będące podstawą jego działania. Właśnie dlatego fizycy wciąż poszukują zjawisk przebiegających w coraz krótszych skalach przestrzennych i czasowych, a jednocześnie pozwalających się w miarę łatwo kontrolować. Jednym z obiecujących kierunków badań wydają się być procesy demagnetyzacji ferromagnetycznych materiałów wielowarstwowych, inicjowane ultraszybkimi impulsami lasera rentgenowskiego. Zespół fizyków z Polski, Niemiec i Włoch, pracujący w europejskim laserze rentgenowskim European XFEL i w ośrodku DESY w Hamburgu, może się pochwalić istotnym osiągnięciem w tej dziedzinie: na łamach prestiżowego czasopisma naukowego „npj Computational Materials” zaprezentowano pierwsze narzędzie pozwalające symulować przebieg demagnetyzacji wywołanej promieniowaniem rentgenowskim. Istotną część zespołu stanowią naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

„W ostatnich latach fizykom udało się dość dobrze poznać procesy demagnetyzacji inicjowane światłem widzialnym i podczerwonym. Gdy jednak chodzi o wpływ promieniowania bardziej energetycznego, rentgenowskiego, wszyscy dopiero stawiamy pierwsze kroki. Wkład naszego zespołu polega na skonstruowaniu modelu teoretycznego o nazwie XSPIN. Za jego pomocą po raz pierwszy można symulować demagnetyzację w wielowarstwowych materiałach ferromagnetycznych wystawionych na femtosekundowe impulsy światła z lasera rentgenowskiego”, mówi prof. dr hab. Beata Ziaja-Motyka (CFEL, DESY i IFJ PAN), która razem z profesorami Alexandrem Lichtensteinem (Hamburg University i European XFEL) i Sergiejem Molodtsovem (European XFEL) zainicjowała opisywany projekt badawczy.

Szybka demagnetyzacja w materiałach wielowarstwowych została odkryta w 1996 roku i od tego czasu przyciągnęła uwagę wielu zespołów naukowych. Z braku urządzeń generujących odpowiednie światło rentgenowskie, badania prowadzono głównie przy użyciu światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Sytuacja zmieniła się radykalnie, gdy w minionej dekadzie fizycy zyskali szerszy dostęp do laserów na swobodnych elektronach (X-Ray Free-Electron Laser, XFEL). Są to bowiem urządzenia zdolne generować impulsy promieniowania rentgenowskiego o dużym natężeniu i czasie trwania liczonym w femtosekundach (czyli miliardowych częściach sekundy). Dzięki nim już kilka lat temu odkryto, że w materiałach wielowarstwowych demagnetyzacja inicjowana promieniowaniem rentgenowskim zachodzi wyraźnie szybciej niż pod wpływem światła widzialnego lub podczerwieni. Brakowało jednak spójnego opisu teoretycznego, zdolnego wiarygodnie symulować jej przebieg.

„XSPIN to rozwinięcie wcześniejszego narzędzia symulacyjnego, konstruowanego przez nas od ponad dekady z myślą o przewidywaniu zjawisk związanych z oddziaływaniem impulsów laserowych na materiały. Model ten nie rozróżniał, jaką orientację mają spiny elektronów w materiałach, a zatem nie opisywał ich właściwości magnetycznych. Główne wyzwanie polegało więc na umiejętnym rozbudowaniu modelu w taki sposób, aby uwzględnić polaryzację elektronów”, mówią dr hab. Konrad J. Kaptcia, prof. UAM (CFEL, DESY i UAM, Poznań) i dr Victor Tkachenko (IFJ PAN), pierwsi autorzy pracy.

Poprawność nowego narzędzia zweryfikowano zestawiając jego przewidywania z danymi zebranymi w jednym z wcześniejszych eksperymentów przeprowadzonych techniką mSAXS w laserze na swobodnych elektronach FERMI we Włoszech. Próbką był wtedy materiał złożony z 16 naprzemiennych warstw kobaltu i platyny, każdej o grubości zaledwie jednego nanometra. Energia fotonów emitowanych przez laser FERMI wynosiła 60 elektronowoltów. W trakcie oddziaływania z materiałem światło rentgenowskie rozpraszało się i za próbką tworzyło pierścień dyfrakcyjny. Pierścień ten to źródło cennych informacji: jego średnica zależy od średniej odległości między domenami magnetycznymi w materiale, a natężenie jest tym większe, im silniejsze są właściwości magnetyczne próbki.

„W analizowanym eksperymencie pierścień dyfrakcyjny zachowywał się zgodnie z przewidywaniami naszego modelu. Gdy natężenie światła oświetlającego próbkę rosło, jego średnica pozostawała stała, zatem układ domen magnetycznych w materiale się nie zmieniał. Jednocześnie im większe było natężenie światła padającego, tym pierścień był słabszy wskutek zachodzącej demagnetyzacji. Ponadto zmierzone czasy demagnetyzacji były rzędu 100 femtosekund, co także zgadzało się z naszymi symulacjami”, podkreśla dr hab. Przemysław Piekarczyk, prof. IFJ PAN.

Zgodność przewidywań modelu z wynikami eksperymentu oznacza, że fizycy po raz pierwszy dysponują narzędziem pozwalającym kontrolować demagnetyzację wywołaną promieniowaniem rentgenowskim. Za pomocą XSPIN-a można teraz dla konkretnego materiału wielowarstwowego tak dopasować parametry impulsów laserowych (ich energię, czas trwania i natężenie), aby demagnetyzacja zachodziła w określonej potrzebami skali przestrzennej i/lub czasowej.

Model XSPIN będzie dalej rozbudowywany i konfrontowany z wynikami kolejnych doświadczeń z materiałami wielowarstwowymi, tyle że zawierającymi już inne ferromagnetyki niż kobalt i oświetlanymi przez fotony o istotnie większych energiach. Najbliższą okazją do dalszej weryfikacji będą dane z lasera LCLS w Stanford, USA, zebrane w eksperymencie z próbką zbudowaną z 40 warstw kobaltu i palladu, a demagnetyzowaną fotonami o energii 780 eV. Planowany jest też podobny eksperyment w laserze European XFEL.

Przeprowadzone symulacje i dotychczasowe pomiary skłaniają naukowców do ostrożnego optymizmu. Coraz więcej wskazuje bowiem, że w przyszłości demagnetyzację indukowaną promieniowaniem rentgenowskim rzeczywiście będzie można wykorzystać do budowy urządzeń nanoelektronicznych nowej generacji. Początkowo mogłyby to być na przykład ultraszybkie przełączniki magnetyczne sterowane impulsami laserowymi. Innym potencjalnym obszarem zastosowań wydają się dynamiczne pamięci komputerowe. W tym kontekście kluczową rolę odgrywają słabo poznane procesy związane z czasami powrotu zdemagnetyzowanych domen do stanu pierwotnego. Odpowiednio głębokie zrozumienie i opisanie tych procesów będzie więc wymagało dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

prof. dr hab. **Beata Ziaja-Motyka**
Center for Free-Electron Laser Science CFEL, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk
tel.: +49 40 8998 6303
email: ziaja@mail.desy.de

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Modeling of ultrafast X-ray induced magnetization dynamics in magnetic multilayer systems”
K. J. Kapcia, V. Tkachenko, F. Capotondi, A. Lichtenstein, S. Molodtsov, L. Müller, A. Philippi-Kobs, P. Piekarczyk, B. Ziaja
npj Computational Materials 8, 212 (2022)
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00895-4>

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ221214b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2022/12/14/IFJ221214b_fot01.jpg
Impuls światła, emitowany przez elektrony w undulatorze lasera rentgenowskiego, trafia w próbkę z materiału o własnościach magnetycznych, rozprasza się i tworzy pierścień dyfrakcyjny. Średnica pierścienia zależy od średniej odległości między domenami magnetycznymi, a jego natężenie jest tym większe, im silniejsze jest namagnesowanie próbki. (Źródło: IFJ PAN)