



Dolinetronika sterowana składem stopu

Naukowcy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, we współpracy z zespołami z Politechniki Wrocławskiej, Uniwersytetu La Sapienza w Rzymie, University of Central Florida, Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (CNRS) w Grenoble, National University of Singapore, CNR-IFN oraz ośrodków badawczych w Czechach (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze) i Japonii (National Institute for Materials Science, NIMS), zaobserwowali nowy mikroskopowy mechanizm umożliwiający precyzyjne sterowanie właściwościami magnetoptycznymi ekscytonów w stopach dwuwymiarowych półprzewodników. Odkrycie to otwiera realne perspektywy zastosowań technologicznych w urządzeniach wykorzystujących dolinetronikę (valleytronics). Wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie „Physical Review Letters”.

Nagroda Nobla z fizyki przyznana w 2010 r. za badania grafenu skierowała zainteresowanie badaczy materii skondensowanej na materiały warstwowe. Ich właściwości, silnie zależne od grubości materiału, niezmiennie fascynują badaczy obiecując nowe, przełomowe zastosowania. Naukowcy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego od lat z sukcesem uczestniczą w dążeniu do ich zrozumienia. We współpracy z zespołami z Politechniki Wrocławskiej, Uniwersytetu La Sapienza w Rzymie, University of Central Florida, Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, CNRS w Grenoble, National University of Singapore, CNR-IFN oraz ośrodków w Czechach (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze) i Japonii (National Institute for Materials Science, NIMS), zaobserwowali oni nowy mikroskopowy mechanizm umożliwiający precyzyjne sterowanie właściwościami magnetoptycznymi ekscytonów w stopach dwuwymiarowych półprzewodników. Wyniki tych badań zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie „Physical Review Letters”.

Ekscytony, czyli związane pary elektronu i dziury w ciele stałym, determinują właściwości optyczne dwuwymiarowych (2D) materiałów warstwowych, w szczególności monowarstwów półprzewodnikowych dichalkogenków metali przejściowych. W zewnętrznym polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny monowarstwy poziom energetyczny ekscytonów z nierównoważnych dolin pierwszej strefy Brillouina ulega rozszczepieniu. Zjawisko jest znane jako ekscytonowy efekt Zeemana. Efekt Zeemana prowadzi do rozszczepienia zdegenerowanych energetycznie linii emisyjnych odpowiadających rekombinacji ekscytonów o dwóch polaryzacjach kołowych (tzw. prawoskrętnej oraz lewoskrętnej, czyli σ^+ i σ^-). Eksperymentalna obserwacja tego rozszczepienia w zewnętrznym polu magnetycznym umożliwia wyznaczenie tzw. g-czynnika ekscytonu, kluczowego parametru opuszcającego wielkość momentu magnetycznego ekscytonu w polu magnetycznym. Parametr ten jest ściśle związany ze strukturą pasmową półprzewodnika oraz sprzężeniem spinowo-dolinowym w materiałach 2D.

W ramach badań zbadano wysokiej jakości monowarstwy stopów mieszanych $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ o precyzyjnie kontrolowanym składzie chemicznym, otrzymane w Czechach i umieszczone pomiędzy płatkami heksagonalnego azotku boru, wytworzonymi w Japonii. Dla serii próbek o różnym składzie molibdenu i wolframu wykonano systematyczne pomiary widm fotoluminescencji w temperaturze 10 kelwinów oraz w silnych polach magnetycznych sięgających 30 tesli w Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych CNRS w Grenoble. Analiza emisji światła w polaryzacjach kołowych umożliwiła bardzo dokładne wyznaczenie wartości g-czynnika ekscytynu neutralnego.

Uzyskane wyniki ujawniły silną, nieliniową zależność g-czynnika od składu chemicznego stopu. Podczas gdy wartość g-czynnika zarówno dla monowarstw dwuselenku molibdenu (MoSe_2) jak i dwuselenku wolframu (WSe_2) równa jest około -4 to w materiale mieszanym ulega dramatycznej zmianie osiągając rekordowe dla stopów zawierających około 20 proc. molibdenu wartości rzędu -10 . – Tak szeroki zakres modulacji g-czynnika ekscytynu nie był dotąd obserwowany w takich monowarstwach. Wcześniej porównywalne wartości uzyskiwano jedynie w złożonych heterostrukturach moiré, wymagających precyzyjnego ustawienia kolejnych warstw względem siebie. W naszej publikacji pokazaliśmy, że w przypadku stopów dichalkogenków metali przejściowych do osiągnięcia tego celu wystarczy kontrola składu chemicznego monowarstwy – wyjaśnia mgr inż. Katarzyna Olkowska-Pucko, doktorantka z Wydziału Fizyki UW, pierwsza autorka pracy, opublikowanej w „Physical Review Letters”.

Kluczowym elementem pracy jest identyfikacja mikroskopowego mechanizmu odpowiedzialnego za obserwowany efekt. Połączenie pomiarów eksperymentalnych z obliczeniami ab initio w ramach teorii funkcjonału gęstości (DFT) wykazało, że za nieliniową modulację g-czynnika odpowiada mieszanie pasm przewodnictwa pomiędzy dolinami K i Q, indukowane przez lokalną niejednorodność stopu. Dodatkowo pokazano, że naprężenia mechaniczne mogą dalej wzmacniać ten efekt.

Odkrycie to otwiera realne perspektywy zastosowań technologicznych w urządzeniach wykorzystujących dolinotronikę (valleytronics). To dziedzina fizyki materii skondensowanej wykorzystująca tzw. "doliny", ekstrema energii w strukturze pasmowej półprzewodników (np. dichalkogenków metali przejściowych) do kodowania i przetwarzania informacji. W porównaniu do klasycznych urządzeń opartych na ładunku lub spinie, dolinotronika oferuje mniejsze zużycie energii i większą wydajność obliczeniową, umożliwiając rozwój nowych technologii informatycznych.

Odkryty mechanizm ma charakter ogólny i otwiera nowy kierunek badań, który można określić jako dolinotronika sterowana składem stopu (alloy-engineered valley physics). – Zapewnia on prostą i skalowalną kontrolę właściwości magnetooptycznych materiałów 2D. Umożliwia też kodowanie, obróbkę i odczyt informacji w wybranych dolinach K^+ i K^- za pomocą polaryzacji światła. Co istotne, uzyskanie bardzo dużych g-czynników ekscytynu pozwala na silne rozszczepienie stanów dolinowych już w niewielkich polach magnetycznych - wyjaśnia dr hab. Maciej Molas, prof. UW, badacz z Wydziału Fizyki UW.

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektów OPUS „Kompleksy ekscytonowe w dwuwymiarowych strukturach van der Waalsa” (kierownik: dr hab. Maciej Molas, prof. UW; nr 2018/31/B/ST3/02111) oraz PRELUDIUM „Właściwości optyczne monowarstw stopów dichalkogenów metali przejściowych” (kierownik: mgr inż. Katarzyna Olkowska-Pucko; nr 2022/45/N/ST3/01887), realizowanych na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Realizacja projektu

badawczego była również wspierana przez dostęp do silnych pól magnetycznych, finansowany w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „EMFL+ Poland” (kierownik: prof. dr hab. Adam Babiński; nr 2025/WK/01).

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki oraz Katedra Metod Matematycznych Fizyki. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 260 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1300 studentów i ok. 150 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 200 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

Katarzyna Olkowska-Pucko, Tomasz Woźniak, Elena Blundo, Natalia Zawadzka, Łucja Kipczak, Paulo E. Faria Junior, Jan Szpakowski, Grzegorz Krasucki, Salvatore Cianci, et al., *Extremely High Excitonic g Factors in 2D Crystals by Alloy-Induced Admixing of Band States*, Phys. Rev. Lett. 136, 076901, 17 February, 2026, DOI: <https://doi.org/10.1103/lx4n-7bb7>

KONTAKT:

dr hab. Maciej Molas, prof. UW
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
tel. +48 22 55 32 721
email: maciej.molas@fuw.edu.pl

mgr inż. Katarzyna Olkowska-Pucko
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
tel. +48 22 55 32 709
email: Katarzyna.Olkowska-Pucko@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>

Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>

Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW260220b_fot01

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2026/FUW260220b_fot01.png

Monowarstwa stopu dichalkogenu metalu przejściowego MoWSe_2 wraz z dolinami K^+ i K^- . Fioletowymi liniami zaznaczono zewnętrzne pole magnetyczne, którego przyłożenie prowadzi do rozszczepienia energii stanów ekscytonowych w wyniku efektu Zeemana. Zjawisko to przedstawiono jako różne odległości pomiędzy pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa w obu dolinach. (źródło Grzegorz Krasucki Wydział Fizyki UW).