

Przełom w badaniach nad wytwarzaniem atomowocienkich kryształów o znakomitych właściwościach optycznych

2020-05-20



Dr hab. Wojciech Pacuski w laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). (Źródło: Wydział Fizyki UW, fot. B. Seredyński)

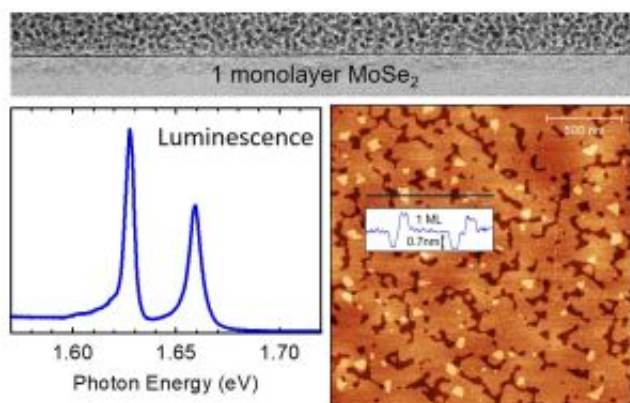
Po raz pierwszy udało się wyhodować dichalkogenki metali przejściowych wykazujące znakomite właściwości optyczne bez procesu eksfoliacji. Zespół naukowców z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pokonał trudności technologiczne, z którymi borykał się przemysł oraz badacze z całego świata. Do tej pory największymi przeszkodami były bardzo ograniczone rozmiary, niejednorodność i poszerzenie linii widmowych wytwarzanych materiałów. Monowarstwy o wielkości zastosowanego podłoża, pozbawione powyższych wad, zostały wyhodowane przy pomocy epitaksji z wiązek molekularnych. Kluczowym elementem okazało się użycie atomowogładkich podłoży z azotku boru.

Dwuwymiarowe kryształy o strukturze plastra miodu robią oszałamiającą karierę w nauce i technologii (jednym z takich materiałów jest np. słynny grafen). Stąd niezwykle pożądane jest opracowanie metod ich produkcji na skalę przemysłową.

Jednak pomimo ogromnych inwestycji w rozwój technik wzrostu atomowocienkich kryształów, wciąż monowarstwy najlepszej jakości otrzymuje się dzięki technice eksfoliacji, czyli dzięki mechanicznemu odrywaniu pojedynczych warstw atomowych od kryształu objętościowego. Odrywanie pojedynczych warstw węglowych od bryłki grafitu to jedna z metod otrzymywania grafenu. Tak wytworzone płatki wykazują wyjątkowe właściwości elektryczne – w porównaniu do grafenu uzyskanego innymi technikami. Jednak rozmiary odrywanych mechanicznie monowarstw są niestety niewielkie.

Również cenne właściwości – tym razem optyczne – dwuwymiarowych kryształów dichalkogenków metali przejściowych (np. diselenku molibdenu) ujawniają się w pełni jedynie dla warstw otrzymanych w wyniku eksfoliacji i poddanych dalszej obróbce mechanicznej, takiej jak umieszczenie pomiędzy warstwami azotku boru. Jednak, jak wspomniano wcześniej, nie jest to technika pozwalająca na otrzymywanie atomowocienkich kryształów na większą skalę. Dodatkowo, konsekwencjami skomplikowanych procesów mechanicznej obróbki są m.in. ograniczony rozmiar uzyskanych monowarstw i niejednorodność struktur związana z pojawieniem się pofałdowań, bąbli, poszarpanych krawędzi czy naprężeń.

Stąd kluczowe jest opracowanie takiej techniki wzrostu dwuwymiarowych kryształów dichalkogenków metali przejściowych, która pozwoli na produkcję monowarstw o dużej powierzchni, w pełni ujawniających wyjątkowe właściwości. Obecnie jedną z najbardziej zaawansowanych technologii wytwarzania warstw kryształów półprzewodnikowych jest epitaksja z wiązek molekularnych (MBE), polegająca na formowaniu w próżni strumieni atomów i kierowaniu ich z różnych stron, z odległości kilkudziesięciu centymetrów, w stronę monokrystalicznego podłoża, na którym dopiero atomy łączą się i wbudowują w sieć krystaliczną. Technologia ta dostarcza struktur dwuwymiarowych o dużych rozmiarach i wysokiej jednorodności, ale jak dotąd jej możliwości w zakresie wytwarzania struktur monoatomowych były bardzo ograniczone. W szczególności właściwości optyczne tak wytworzonych materiałów były do tej pory znacznie poniżej oczekiwań. Na przykład, światło emitowane z tego typu próbek miało niekorzystne widmo optyczne – linie emisyjne związane z ekscytonem były szerokie – co nie dawało nadziei na wykorzystanie na większą skalę spektakularnych właściwości optycznych dichalkogenków metali przejściowych.



Od góry - przekrój przez monowarstwę dwuwymiarowego materiału – diselenku molibdenu (MoSe₂) wyhodowanego metodą epitaksji z wiązek molekularnych na podłożu z azotku boru. Po lewej – widmo fotoluminescencji z wąskimi rezonansami ekscytonowymi świadczącymi o wysokiej jakości optycznej warstwy. Po prawej – widok z góry uzyskany przy pomocy mikroskopu sił atomowych (AFM), na którym widać, że większość powierzchni to monowarstwa, z małymi plamkami dwuwarstwy, i małymi obszarami nieprzykrytego podłoża hBN. (Źródło: Wydział Fizyki UW)

Właśnie w tym zakresie przełomowego odkrycia dokonali naukowcy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, we współpracy z laboratoriami z Europy i Japonii. Przeprowadzili szereg badań nad wzrostem monowarstw dichalkogenków metali przejściowych na różnych podłożach i w różnych warunkach. Okazało się, że jeden rodzaj podłoża daje nieporównywalnie lepsze możliwości wzrostu niż pozostałe. Tym najlepszym podłożem jest atomowogładki azotek boru, taki jak np. wytwarzany w sławnym National Institute for Materials Science w Tsukubie (Japonia). Używając tego podłoża, w laboratorium MBE na Uniwersytecie Warszawskim wyhodowano gładkie kryształy o grubości monowarstwy i o rozmiarach równych rozmiarowi podłoża, wykazujące jednorodne parametry na całej powierzchni, w tym – co najcenniejsze – znakomite właściwości optyczne, uzyskane po raz pierwszy dla

wyhodowanych monowarstw dichalkogenków metali przejściowych.

Badania wytworzonych warstw o rekordowych parametrach optycznych były prowadzone w Laboratorium Ultraszybkiej Magnetospektroskopii na Uniwersytecie Warszawskim. Obejmują one spektroskopowe pomiary fotoluminescencji, odbicia światła i generacji drugiej harmonicznej, a także badania powierzchni przy pomocy dyfrakcji elektronów i mikroskopu sił atomowych (AFM). Natomiast w Instytucie Fizyki PAN, przy pomocy mikroskopu elektronowego, udało się zrobić piękne zdjęcia przekrojowe, na których widać atomową cienkość i gładkość wytworzonych warstw.

Wyniki prac zostały opublikowane w najnowszym tomie prestiżowego pisma „Nano Letters”. Odkrycie ukierunkowuje przyszłe badania nad przemysłowym wytwarzaniem atomowocienkich materiałów – w szczególności wskazuje potrzebę opracowania jeszcze większych i jeszcze gładszych podłoży z azotku boru. Na takich podłożach będzie można hodować monowarstwy, których właściwości elektronowe i optyczne dorównują parametrom płatków uzyskiwanych z eksfoliacji, a których rozmiary i jednorodność pozwalają na zastosowanie w przemyśle optoelektronicznym.

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 Instytut: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ok. 200 nauczycieli akademickich, wśród których jest 87 pracowników z tytułem profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 170 doktorantów.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

W. Pacuski, M. Grzeszczyk, K. Nogajewski, A. Bogucki, K. Oreszczuk, J. Kucharek, K.E. Połczyńska, B. Seredyński, A. Rodek, R. Bożek, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Kret, J. Sadowski, T. Kazimierzczuk, M. Potemski, P. Kossacki, „Narrow Excitonic Lines and Large-Scale Homogeneity of Transition-Metal Dichalcogenide Monolayers Grown by Molecular Beam Epitaxy on Hexagonal Boron Nitride”, Nano Lett. 20, 3058 (2020).
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b04998> (otwarty dostęp).

KONTAKT:

Dr hab. Wojciech Pacuski
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego,
Instytut Fizyki Doświadczalnej, Zakład Fizyki Ciała Stałego,
Laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych (MBE),
Laboratorium Ultraszybkiej Magnetospektroskopii (LUMS),
e-mail: Wojciech.Pacuski@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://twitter.com/MBEatUW>

<https://www.fuw.edu.pl/~wmpac/mbe/mbe.htm>

Strona Laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych (MBE)

<http://lump.fuw.edu.pl/?lang=pl>

Strona Laboratorium Ultraszybkiej Magnetospektroskopii (LUMS)

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

Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW200520b_fot01

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200520b_fot01.jpg

Okladka Nano Letters - monowarstwa dwuwymiarowego materiału – diselenku molibdenu (MoSe_2) powstaje w wyniku skierowania wiązek molekularnych selenu i molibdenu na atomowogładkie podłoże z azotku boru. Użycie tego podłoża jest kluczowe dla zapewnienia znakomitych właściwości optycznych MoSe_2 .

FUW200520b_fot02

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200520b_fot02.jpg

Od góry - przekrój przez monowarstwę dwuwymiarowego materiału – diselenku molibdenu (MoSe_2) wyhodowanego metodą epitaksji z wiązek molekularnych na podłożu z azotku boru. Po lewej – widmo fotoluminescencji z wąskimi rezonansami ekscytonowymi świadczącymi o wysokiej jakości optycznej warstwy. Po prawej – widok z góry uzyskany przy pomocy mikroskopu sił atomowych (AFM), na którym widać, że większość powierzchni to monowarstwa, z małymi plamkami dwuwarstwy, i małymi obszarami nieprzykrytego podłoża hBN. (Źródło: Wydział Fizyki UW)

FUW200520b_fot03

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200520b_fot03.jpg

Dr hab. Wojciech Pacuski w laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). (Źródło: Wydział Fizyki UW, fot. B. Seredyński)



[FUW200520a - atomowocienkie_kryształy.pdf \(132.8 kB\)](#)