

Intrygujące właściwości optoelektroniczne stosów kryształów dwuwymiarowych

2019-09-16

Zespół naukowców z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Narodowego Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych CNRS Grenoble, Uniwersytetów w Manchesterze i Exeter oraz Narodowego Instytutu Inżynierii Materiałowej Tsukuba opisał intrygujące właściwości elektrycznie wzbudzonej emisji światła w heterostrukturach van der Waalsa. Zaobserwowano emisję światła dla dużo niższych napięć niż odpowiadająca im energia emitowanych fotonów. Generalnie, dla diod świecących można oczekiwać, że energia emitowanych fotonów jest mniej więcej równa energii wynikającej z przyłożonego do diody napięcia. W przypadku badanych heterostruktur emisja fotonów o energii 1.9 eV pojawia się już dla dużo niższych przyłożonych napięć - około 1.3 V. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie Nature Communications..

Intensywne badania nad grafenem, które rozpoczęto przeszło dekadę temu, dały początek nowej, bardzo szybko rozwijającej się dziedzinie fizyki materii skondensowanej, która zajmuje się kryształami dwuwymiarowymi. Podobnie jak w przypadku grafenu, istnieje szeroka gama innych warstwowych materiałów, które mogą być eksfoliowane do pojedynczej warstwy z kryształów objętościowych. Właściwości tych pojedynczych warstw mogą się drastycznie różnić od ich odpowiednika objętościowego, czy też nawet kilkuwarstwowego. Spektrum dostępnych kryształów dwuwymiarowych jest bardzo różnorodne i obejmuje izolatory, półprzewodniki, metale, a nawet nadprzewodniki. Kryształy dwuwymiarowe są obecnie intensywnie badane, a ten trend utrzyma się najpewniej także w przyszłości. Niedawno przedstawiona koncepcja tak zwanych heterostruktur van der Waalsa (vdW), w przypadku których nakłada się wiele kryształów dwuwymiarowych na siebie, tworząc pewien rodzaj sztucznego kryształu, otwiera ponadto jeszcze większe możliwości dotyczące zarówno zastosowań jak i badań podstawowych. Nazwa heterostruktury *van der Waalsa* wywodzi się z faktu, iż pomiędzy sąsiadującymi warstwami krystalicznymi nie ma wiązań kowalencyjnych – wiąże je ze sobą jedynie słabe oddziaływanie *van der Waalsa*. Co istotne, brak wiązań kowalencyjnych oznacza, że nie ma ograniczeń (powodowanych przez różnice w stałych sieci) dotyczących kombinacji różnych materiałów i w związku z tym, co do zasady, dowolne połączenie różnych materiałów staje się możliwe. Mamy więc do czynienia z układami podobnymi do tych, jakie można zbudować z klocków Lego, z tym że w nanoskali. Takie NanoLego daje możliwość uzyskania zupełnie nowych funkcjonalności w skali nano – dających nadzieję na nowatorskie rozwiązania w obszarze elastycznej elektroniki i optoelektroniki, czy też pozyskiwaniu energii słonecznej.

Zespół naukowców z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Narodowego Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych CNRS (Grenoble, Francja), Uniwersytetu w Manchesterze (Wielka Brytania), Uniwersytetu w Exeter (Wielka Brytania) i Narodowego Instytutu Inżynierii Materiałowej (Tsukuba, Japonia) poddał badaniu elektrycznie wzbudzaną emisję światła w specjalnie zaprojektowanej heterostrukturze van der Waalsa. Aktywna część struktury, składająca się z dwóch warstw półprzewodnikowych (MoS_2 , WSe_2) oddzielonych warstwami heksagonalnego azotku boru (h-BN), wytworzona została przez grupę noblisty, prof. Konstantina Novoselova, w Manchesterze. Właściwości

optoelektroniczne struktury zostały zbadane w Warszawie i w Grenoble. Warto podkreślić, że te złożone, prototypowe struktury są wytwarzane za pomocą zoptymalizowanej wersji tak zwanej *metody taśmy klejącej*, w której warstwy są eksfoliowane przy użyciu specjalnej taśmy klejącej i układane w heterostrukturę *van der Waalsa* pod mikroskopem optycznym.

(a) Schemat badanej próbki oraz (b) otrzymany w mikroskopie optycznym obraz heterostruktury vdW wraz z połączeniami elektrycznymi; (c) rysunek ilustrujący wstrzykiwanie elektronów (dziur), umożliwiające tworzenie się międzywarstwowych ekscytonów (IX).

W opublikowanej w czasopiśmie *Nature Communications* i dodatkowo ujętej w Editor Highlights pracy naukowcy opisali intrygujące zachowanie heterostruktury vdW - emisję światła dla dużo niższych napięć niż odpowiadająca im energia emitowanych fotonów. Generalnie, dla diod świecących można oczekiwać, że energia emitowanych fotonów jest mniej więcej równa energii wynikającej z różnicy potencjałów przyłożonych do diody (napięcia). Dlatego też dioda emitująca czerwone światło wymaga niższego przykładanego napięcia niż dioda emitująca światło niebieskie. Jednakże, w omawianej tu publikacji, J. Binder wraz ze współpracownikami zaobserwowali emisję fotonów o energii 1,9 eV (co odpowiada długości fali 650 nm) dla przykładanych napięć około 1,3 V. Oznacza to, że w układzie zachodzi zjawisko konwersji energii emisji w górę (ang. up-conversion). Nie oznacza to jednak sprzeczności z zasadą zachowania energii. Ten niespodziewany wynik został przez autorów publikacji wyjaśniony w oparciu o właściwości silnie związanych par elektron-dziura (ekscytonów), dla których elektron znajduje się w jednym dwuwymiarowym półprzewodniku (MoS_2), a dziura w drugim (WSe_2). Te tak zwane „międzywarstwowe ekscytony” mają długi czas życia i mogą rekombinować promieniście (emitując foton) albo niepromieniście (nie emitując fotonu). W publikacji autorzy przypisują emisję fotonów o energii wyższej niż spodziewana ekscytonowemu efektowi Augera, dla którego jeden międzywarstwowy ekscyton rekombinuje niepromieniście, przekazując energię i pęd innym ekscytonom. W ten sposób mogą one uzyskać energię wyższą niż wynika to z przyłożonego do heterostruktury napięcia. Wynik ten jest bardzo istotny w kontekście projektowania nowych urządzeń emitujących światło składających się z kryształów dwuwymiarowych, jak też prób zaobserwowania fundamentalnych zjawisk fizycznych takich jak nadciekłość czy kondensacja Bosego-Einsteina w układzie międzywarstwowych ekscytonów w heterostrukturach *van der Waalsa*.

Publikacja naukowa:

Upconverted electroluminescence via Auger scattering of interlayer excitons in van der Waals heterostructures, J. Binder, J. Howarth, F. Withers, M.R. Molas, T. Taniguchi, K. Watanabe, C. Faugeras, A. Wysmolek, M. Danovich, V.I. Fal'ko, A.K. Geim, K.S. Novoselov, M. Potemski, A. Kozikov *Nature Communications* (2019) 10:2335
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-10323-9>.

Kontakty:

dr Johannes Binder
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel: +48 22 55 32 792
email: johannes.binder@fuw.edu.pl