

Podsumowanie osiągnięć zawodowych

1. Imię i nazwisko.

Johannes Robert Binder

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2015 - Stopień **doktora nauk fizycznych** (z wyróżnieniem) nadany przez Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Tytuł rozprawy doktorskiej: "Carbon based nanostructures for detectors and biosensors", promotor: prof. dr hab. Andrzej Wymołek, promotor pomocniczy: dr Marta Borysiewicz

2010 - "**Diplom-Physiker**" (**magister**) przyznany przez Uniwersytet w Tybindze, Niemcy, promotor: prof. Dieter Kern. Tytuł pracy magisterskiej: "Electron source with carbon nanotubes as field emitters".

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Czerwiec 2016 - obecnie - **adiunkt (badawczo-dydaktyczny)** na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Maj 2015 - kwiecień 2016 - **stanowisko post-doc** w Narodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, Grenoble, Francja (grupa prof. Marka Potemskiego)

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Osiągnięcie opisane w niniejszym paragrafie opiera się na serii publikacji dotyczących tematu "**Efekty fizyczne na interfejsach między i wewnątrz materiałów warstwowych**". Seria składa się z następujących sześciu publikacji naukowych:

[H1] **J. Binder**, F. Withers, M.R. Molas, C. Faugeras, K. Nogajewski, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kozikov, A.K. Geim, K.S. Novoselov, M. Potemski "*Sub-bandgap Voltage Electroluminescence and Magneto-oscillations in a WSe₂ Light-Emitting van der Waals Heterostructure*" *Nano Letters* 17, 1425-1430 (2017)

Przeprowadziłem pomiary optoelektroniczne, przeanalizowałem i zinterpretowałem dane eksperymentalne, uczestniczyłem w dyskusjach, opracowałem model i napisałem wersję roboczą publikacji. Jestem również autorem korespondencyjnym tej pracy.

[H2] **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 "Upconverted electroluminescence via Auger scattering of interlayer excitons in van der Waals heterostructures" *Nature Communications* 10, 2335 (2019)

Przeprowadziłem pomiary optoelektroniczne, przeanalizowałem i zinterpretowałem dane eksperymentalne, uczestniczyłem w dyskusjach, opracowałem model i napisałem wersję roboczą manuskryptu.

[H3] **J. Binder**, J. Rogoza, L. Tkachenko, I. Pasternak, J. Sitek, W. Strupinski, M. Zdrojek, J.M. Baranowski, R. Stepniewski, A. Wysmolek "Suspended graphene on germanium: Selective local etching via laser-induced photocorrosion of germanium" *2D Materials* 8, 035043 (2021)

Wymyśliłem i przeprowadziłem eksperymenty, przeanalizowałem dane i opracowałem model wyjaśniający obserwacje. Napisałem pierwszą wersję publikacji i wniosek patentowy. Jestem również autorem korespondencyjnym tej pracy.

[H4] **J. Binder**, A. K. Dąbrowska, M. Tokarczyk, K. Ludwiczak, R. Bozek, G. Kowalski, R. Stepniewski, and A. Wysmolek "Epitaxial hexagonal boron nitride for hydrogen generation by radiolysis of interfacial water" *Nano Letters* 23, 1267-1272 (2023)

Wykonałem obrazowanie skaningowym mikroskopem elektronowym i napromieniowanie elektronami, przeprowadziłem pomiary optyczne, zinterpretowałem wyniki, wymyśliłem eksperyment z ciężką wodą i napisałem pierwszą wersję manuskryptu. Jestem również autorem korespondencyjnym tej pracy.

[H5] K. Ludwiczak, E. Lacinska, **J. Binder**, I. Lutsyk, M. Rogala, P. Dabrowski, Z. Klusek, R. Stepniewski, A. Wysmolek "Impeded phase transition in 1T-TaS₂ : Thermoelectric fingerprint of long-lived mixed states" *Solid State Communications* 305, 113749 (2020)

Uczestniczyłem w pomiarach optycznych i optoelektronicznych, byłem opiekunem studentki studiów licencjackich i współopiekunem doktorantki, zaproponowałem i opracowałem układ eksperymentalny, zinterpretowałem dane i uczestniczyłem w pisaniu manuskryptu. Jestem również autorem korespondencyjnym tej pracy.

[H6] E. M. Lacinska, M. Furman, **J. Binder**, I. Lutsyk, P. J. Kowalczyk, R. Stepniewski, A. Wysmolek "Raman Optical Activity of 1T-TaS₂ " *Nano Letters*, 22, 2835 - 2842 (2022)

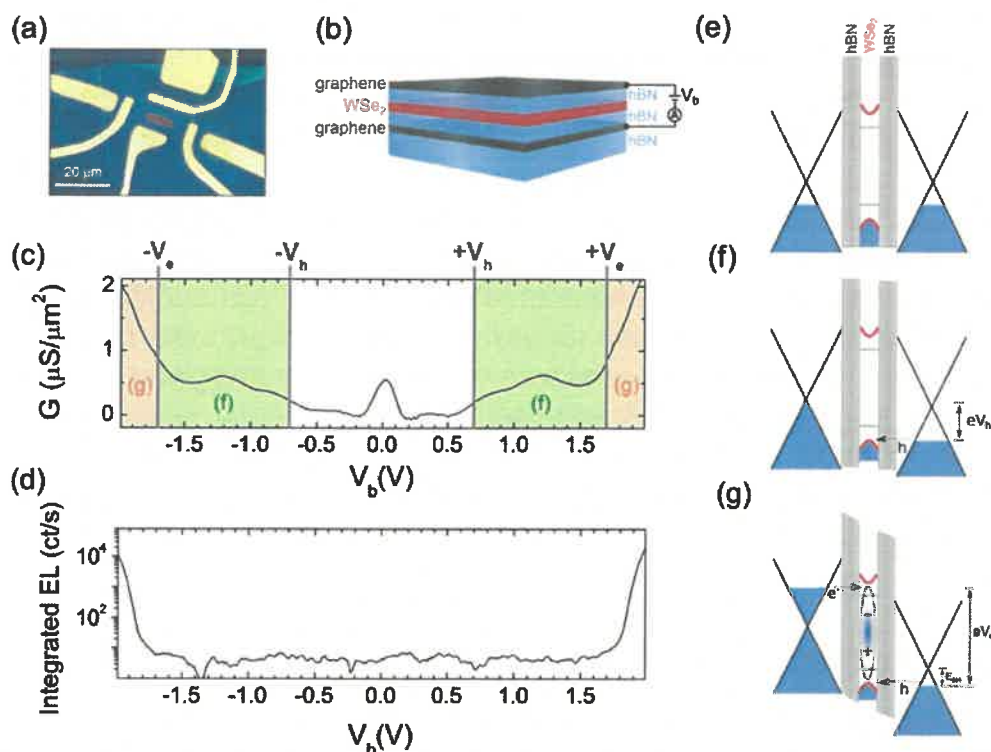
Uczestniczyłem w pomiarach optycznych, byłem współopiekunem doktorantki, uczestniczyłem w opracowywaniu konfiguracji eksperymentalnej, interpretowałem dane i uczestniczyłem w pisaniu manuskryptu.

Przedstawiona powyżej seria publikacji zawiera wyniki, które odnoszą się do fundamentalnego pytania badawczego dotyczącego efektów fizycznych zachodzących między interfejsami materiałów warstwowych (w przypadku pojedynczych lub kilku warstw - materiałów dwuwymiarowych (2D)) z innymi materiałami (materiałami 2D, konwencjonalnymi półprzewodnikami objętościowymi, cieczami i gazami) oraz "interfejsami" występującymi w pojedynczym materiale warstwowym, który może zawierać różne fazy w tym samym czasie. Uzyskana wiedza ma duże znaczenie zarówno z fundamentalnego, naukowego punktu widzenia, jak i dla przyszłych zastosowań opartych na nowatorskiej koncepcji heterostruktur van der Waalsa (vdW) [1]. Wiadomo, że zwłaszcza materiały 2D, ze względu na ich obniżoną wymiarowość, są podatne na właściwości fizyczne ich otoczenia i tylko dogłębne zrozumienie głównych efektów zachodzących na interfejsach pozwala na badanie nowych zjawisk fizycznych i opracowywanie nowych koncepcji urządzeń optoelektronicznych.

1. Interfejsy materiałów 2D z innymi materiałami 2D ([H1] i [H2])

Pierwsza część moich badań była poświęcona interfejsom materiałów 2D z innymi materiałami 2D. Takie struktury nazywane są heterostrukturami van der Waalsa (vdW). Ze względu na brak wiązań kowalencyjnych poza płaszczyzną, możliwe staje się układanie materiałów warstwowych różnego typu (metal, półprzewodnik, izolator) o różnych stałych sieciowych, otwierając nowe możliwości budowy urządzeń optoelektronicznych [1]. Przykładem takiej klasy urządzeń są diody elektroluminescencyjne oparte na heterostrukturach vdW [2], które badałem w pracach [H1] i [H2].

Rysunek 1 (a) przedstawia obraz mikroskopowy stosu złożonego z warstw 2D, a rysunek 1 (b) przedstawia schematyczny obraz struktury wykorzystanej w pracy [H1]. Próbkę została wytworzona za pomocą mechanicznej eksfoliacji materiałów warstwowych w celu uzyskania płatków o grubości pojedynczej lub kilku warstw, które są następnie układane jedna na drugiej. Proces wytwarzania został przeprowadzony w grupie laureata nagrody Nobla, prof. Konstantina Novoselova na Uniwersytecie w Manchesterze. Próbkę ta składała się z monowarstwy (ML) WSe₂, która jest półprzewodnikowym dichalkogenkiem metalu przejściowego (TMD) z prostą przerwą energetyczną, umieszczonym z obu stron w heksagonalnym azotku boru (hBN) i monowarstwowych elektrod grafenowych. Rysunek 1 (c) pokazuje przewodnictwo różniczkowe tej struktury po przyłożeniu napięcia między dwiema elektrodami grafenowymi. Silny wzrost przewodnictwa przy około 1,7 V odpowiada silnemu wzrostowi zmierzonego natężenia elektroluminescencji (EL) (rys. 1 (d)).

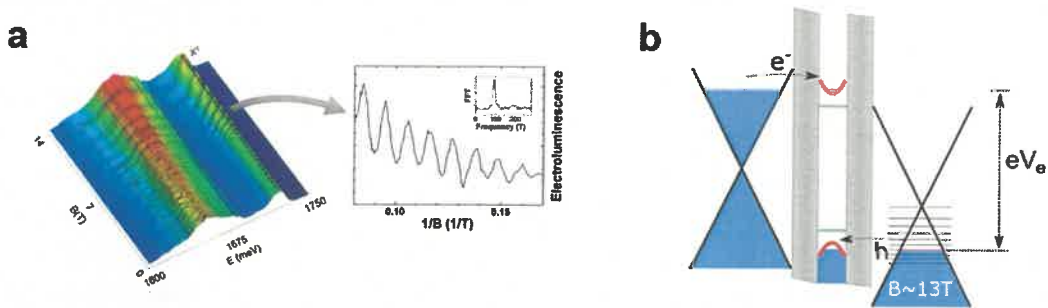


Rysunek 1: (a) Obraz próbki z mikroskopu optycznego. Brązowy obszar wskazuje platek WSe₂. (b) Schematyczna ilustracja heterostruktury vdW. (c) Przewodnictwo różniczkowe $G = dI/dV_b$. (d) Zależność sygnału EL od napięcia. (e) Schemat obrazujący układu pasm dla zerowego napięcia. (f) Schemat obrazujący układu pasm dla przypadku pośredniego napięcia. (g) Schemat pasm dla dużego napięcia. W tym przypadku zarówno dziury, jak i elektrony mogą tunelować i bezpośrednio tworzyć ekscytony.

Rysunki 1 (e)-(g) przedstawiają mechanizm, który prowadzi do obserwowanego przepływu prądu. Oczywiście jest, że obserwowany prąd jest spowodowany tunelowaniem nośników ładunku przez interfejsy między materiałami 2D. Napięcie progowe EL wynosi około 1,7 V, co odpowiada energii przejścia ekscytonowego monowarstwy WSe₂. Jednakże przerwa energetyczna ML WSe₂ (~2.0 - 2.2 eV) [3], [4] jest znacznie większa niż odpowiednie napięcie progowe. Różnica wynika z dużej energii wiązania ekscytonów w ML WSe₂. Obserwacja EL dla napięć około 1,7 V oznacza, że tunelowanie zachodzi bezpośrednio do stanu ekscytonowego, a nie poprzez elektrony (dziury), które są najpierw wstrzykiwane do pasma przewodnictwa (walencyjnego), co wymagałoby napięć powyżej 2 V. Należy zauważyć, że pomiary przeprowadzono w temperaturze $T = 4$ K. Nasze badania ujawniły zatem proces emisji dla napięć mniejszych niż wynikałoby to z przerwy energetycznej w emitujących światło heterostrukturach vdW.

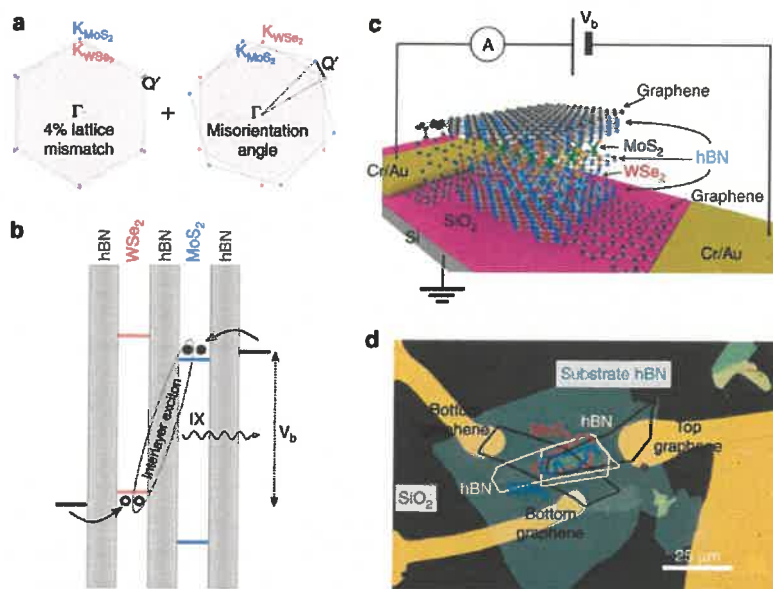
Dodatkową obserwacją związaną z transferem ładunku przez interfejs materiał 2D / materiał 2D przedstawiono na rysunku 2 (a). Pokazuje on zależność intensywności EL od pola magnetycznego. Widoczne są wyraźne oscylacje EL w polu magnetycznym pokazujące zależność $1/B$. Interpretację tych oscylacji przedstawiono na rysunku 2 (b). Po przyłożeniu pola magnetycznego gęstość stanów (DOS) w elektrodach grafenowych odzwierciedla układ poziomów Landaua. Kwantyzacja DOS prowadzi do oscylacji prawdopodobieństwa tunelowania z grafenu do emitującej światło warstwy

WSe₂, co można bezpośrednio zaobserwować jako oscylacje intensywności EL. Charakterystyczna cecha grafenu jest odzwierciedlona w tej modulacji poprzez pierwiastkową zależność energii poziomów Landaua od pola magnetycznego [H1].



Rysunek 2: (a) Wykres 3D sygnału EL w funkcji pola magnetycznego. Inset: Intensywność swobodnego ekscytonu w funkcji $1/B$. (b) Schematyczna ilustracja kwantyzacji Landaua w elektrodzie grafenowej prowadzącej do oscylacji magnetycznych.

Heterostruktury vdW badane w pracy [H2] są bardziej złożone i zawierają dwie różne TMD o grubości pojedynczej warstwy atomowej (MoS₂ i WSe₂) - rys. 3 (c,d). Struktura ta jest asymetryczna i ma układ pasm typu II (rys. 3 (b)).

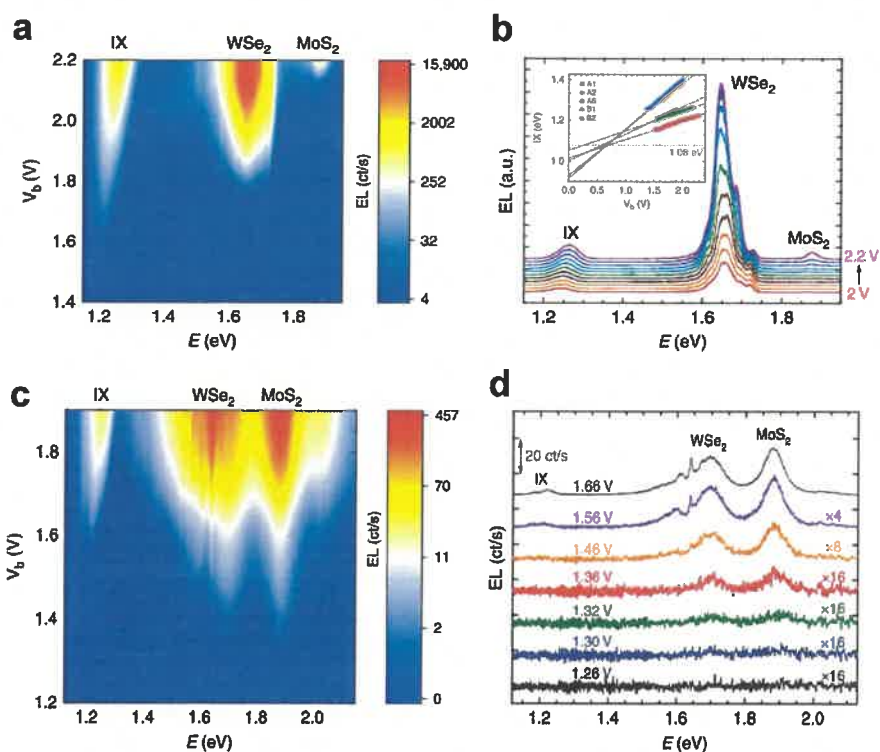


Rysunek 3: (a) Strefy Brillouina WSe₂ (czerwona) i MoS₂ (niebieska) ilustrujące moment pędu Q' wynikający z niedopasowania sieciowego i kąta dezorientacji. (b) Schematyczna ilustracja ułożenia pasma typu II dla heterostruktur MoS₂ / WSe₂. Przerwana elipsa wskazuje powstawanie ekscytonu międzywarstwowego składającego się z elektronu w paśmie przewodnictwa MoS₂ i dziury w paśmie walencyjnym WSe₂. (c) Schematyczny rysunek heterostruktury pokazanej w (b). (d) Obraz z mikroskopu optycznego pokazujący aktywny obszar urządzenia.

W strukturach tego typu oczekuje się, że po elektrycznym wstrzyknięciu do nich ładunków powstaną skośne, międzywarstwowe ekscytony. Co najważniejsze, takie przejścia są nie tylko skośne w przestrzeni rzeczywistej (z elektronami w MoS₂ i

dziurami w WSe₂), ale także skośne w przestrzeni odwrotnej. To niedopasowanie pędu można podzielić na dwa wkłady, które pokazano schematycznie na rys. 3 (a). Po pierwsze, MoS₂ i WSe₂ mają niedopasowanie sieciowe wynoszące około 4%. Po drugie, niewłaściwa orientacja warstw (kął skręcenia) prowadzi do dodatkowego niedopasowania.

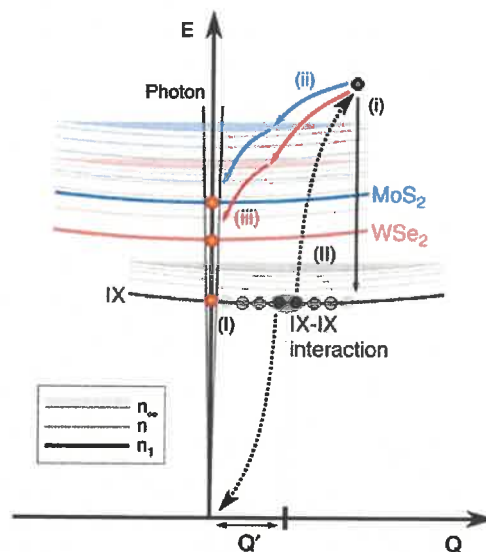
W publikacji [H2] zbadałem siedem urządzeń opartych na strukturach vdW, z których pięć miało barierę hBN między TMD, a dwa nie miały bariery. W przypadku urządzeń bez bariery zaobserwowano typowe zachowanie emisji EL z przyłożonym napięciem, które występuje w sposób schodkowy zgodnie z narastającymi energiami rezonansów ekscytonowych. Najpierw zaobserwowano emisję skośnego ekscytonu (IX), a następnie emisję WSe₂ dla napięć około 1,75 V i 2,1 V w przypadku MoS₂ (rys. 4 (a-b)). Emisja IX zmienia się wraz ze wzrostem napięcia, co jest konsekwencją pola elektrycznego, które tworzy się między dwoma TMD. Takie zachowanie jest charakterystyczną cechą skośnych ekscytonów. Emisja IX jest zatem przestrajalna napięciem zewnętrznym z efektywnością w zakresie 90 - 200 meV/V. Na podstawie zachowania emisji IX mogłem również oszacować przesunięcie pasm („offset”) na interfejsie między MoS₂ i WSe₂ na około 1,08 eV (rys. 4 (b)).



Rysunek 4: (a) Kolorowa mapa zależności widm EL od napięcia. (b) Widma EL dla napięć w zakresie $V_b = 2,0 - 2,2$ V z (a). Wstawka w panelu (b) pokazuje pozycję piku IX dla pięciu różnych próbek i liniowe dopasowanie do zależności. (c) Kolorowa mapa widm EL jako funkcja napięcia dla próbki z jednowarstwową barierą hBN. (d) Widma EL dla siedmiu różnych napięć z (c). Dla napięcia $V_b = 1,32$ V obserwuje się emisję przy energiach do około 1,9 eV, co wyraźnie ilustruje duży efekt konwersji energii emisji w górę.

Sytuacja zmienia się dla próbek z jednowarstwową barierą hBN pomiędzy TMD. Rysunek 4 (c,d) pokazuje, że teraz emisja związana z WSe₂ (~1,7 eV) i MoS₂ (~1,9

eV) pojawia się dla napięć tak niskich jak około 1,3 V, co stanowi niezwykłą konwersję energii emisji w górę (ang. upconversion) o $\sim 0,6$ eV. Mechanizm fizyczny stojący za tą obserwacją zilustrowano na rysunku 5. Skośny charakter ekscytonu IX jest odzwierciedlany przez niedopasowanie pędu (Q'), jak wskazano na tym dwucząsteczkowym obrazie. W konsekwencji niskiej bariery energetycznej, IX powstają w dużych ilościach. Ze względu na niedopasowanie pędu, nie znajdują się one w stożku światła i nie mogą efektywnie rekombinować promieniście. Tak więc dalsze pompowanie elektryczne tworzy duże populacje ekscytonów IX, które mogą prowadzić do rekombinacji promienistej (I), jeśli ekscytony IX osiągną pęd Q' . Kanał ten jest jednak bardzo nieefektywny. Dalszy wzrost populacji ekscytonów IX prowadzi do efektywnej rekombinacji nieradiacyjnej poprzez zderzenia ekscytonów IX-IX. W takim procesie energia jest przekazywana do innego ekscytonu IX, który jest wzbudzany do kontinuum stanów ekscytonowych (II). Z tego stanu ekscyton może albo zrelaksować z powrotem do stanu skośnego IX, co nazywane jest (i) anihilacją ekscyton-ekscyton, albo zrelaksować do stanu, który odpowiada ekscytonowi wewnątrzwarstwowemu (ii) MoS₂ lub (iii) WSe₂. Procesy (ii) i (iii) są ekscytonowymi procesami Augera, które mogą wyjaśnić obserwowaną, elektrycznie indukowaną konwersję energii emisji w górę.

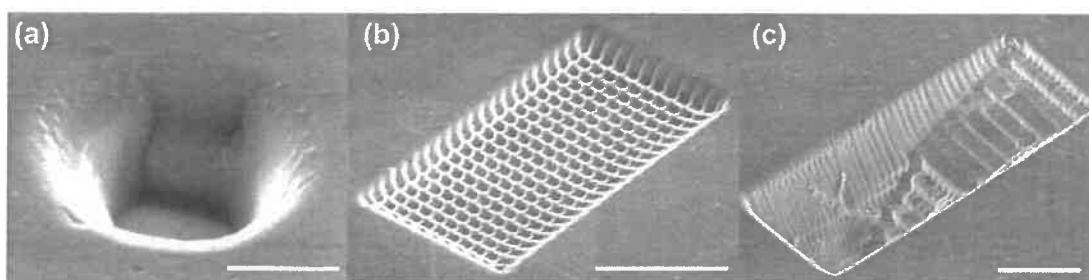


Rysunek 5: Mechanizm emisji konwertowanej w górę w obrazie dwucząsteczkowym. Linie ciągłe przedstawiają dyspersję stanu podstawowego n_1 dla IX (szara), MoS₂ (niebieska) i WSe₂ (czerwona). Kółka reprezentują ekscytony. Q' to niedopasowanie pędu. Przerwane linie wskazują stany wzbudzone n , a zaciemniony obszar oznacza kontinuum ekscytonowe n_∞ . Cieniowanie kółka w skali szarości schematycznie pokazuje rozkład pędu ekscytonów. Jasne cieniowanie wskazuje, że jest mniej ekscytonów dla danego pędu niż w przypadku ciemnego cieniowania. Dyspersja fotonów jest nałożona na schemat (szare linie), aby zaznaczyć obszar efektywnej rekombinacji promienistej (pomarańczowe kółka). W przedstawionej sytuacji napięcie jest poniżej progu dla bezpośredniego transferu ładunku wewnątrz warstwy. Mechanizm (I) ilustruje emisję radiacyjną IX zasilaną przez rosnącą liczbę skośnych ekscytonów IX o dużych pędach. Mechanizm (II) przedstawia ekscytonowe procesy Augera. Szara elipsa schematycznie podkreśla interakcję między dwoma przykładowymi ekscytonami. W wyniku tego oddziaływania jeden ekscyton rekombinuje nieradiacyjnie i przekazuje energię drugiemu ekscytonowi (strzałki z przerywanymi liniami). Relaksacja: (i) opisuje relaksację z powrotem do stanu podstawowego IX (anihilacja ekscyton - ekscyton), (ii) i (iii) relaksację odpowiednio do MoS₂ i WSe₂, co prowadzi do konwersji energii emisji w górę.

Zaobserwowany mechanizm pokazuje, że w takich strukturach można osiągnąć duże populacje ekscytonów skośnych IX, co jest interesujące z punktu widzenia możliwej kondensacji Bosego-Einsteina. Co więcej, obserwujemy, że efekt Augera skutecznie przekształca część rekombinacji nieradiacyjnej w rekombinację radiacyjną zachodzącą w warstwach ML TMD. W ten sposób część utraconej emisji jest odzyskiwana przez ten mechanizm, co może być interesującym aspektem dla inżynierii przyszłych urządzeń vdW emitujących światło.

2. Interfejs między materiałem 2D i półprzewodnikiem objętościowym [H3]

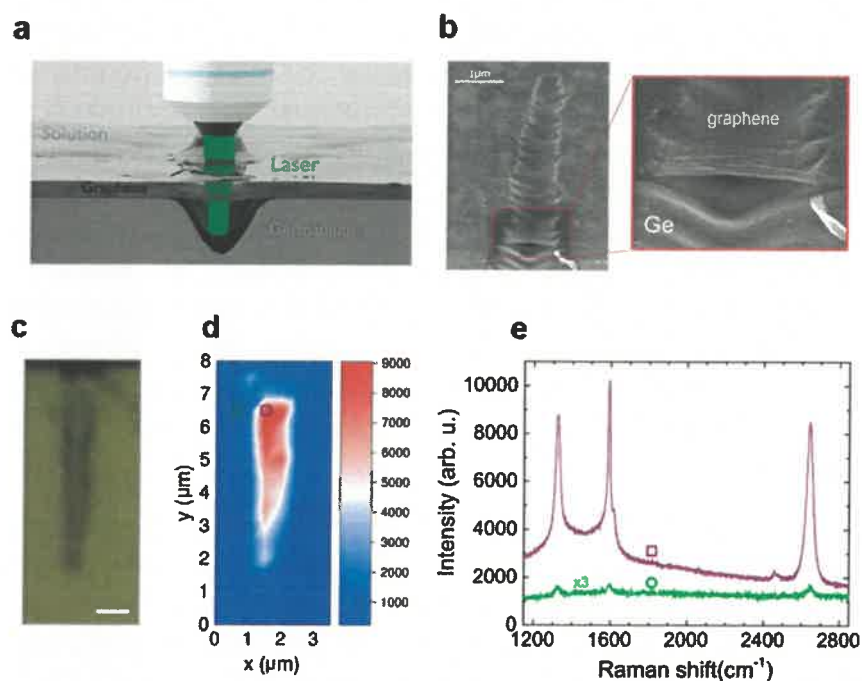
Ta część moich badań była poświęcona grafenowi na germanie, który jest uważany za obiecujący materiał do integracji grafenu z technologią opartą na krzemie [5]. Jest ogólnie przyjęte, że widmo ramanowskie grafenu wyhodowanego na germanie wykazuje bardzo niską intensywność, co można stwierdzić bezpośrednio na podstawie stosunku natężenia pików ramanowskich grafenu na germanie do intensywności pików odpowiadającym wzbudzeniu azotu w powietrzu ($\sim 2330 \text{ cm}^{-1}$) przedstawionego w kilku publikacjach [6, 7]. Aby odpowiedzieć na pytanie, czy te niskie intensywności sygnałów ramanowskich są ogólną cechą grafenu na germanie, czy jednak wynikają z właściwości interfejsu materiału 2D z półprzewodnikiem objętościowym, opracowałem nowatorską technikę lokalnego trawienia germanu bez uszkodzania grafenu [H3]. Proces trawienia jest możliwy dzięki mechanizmowi fotokorozji, który był wcześniej stosowany w przypadku domieszkowanych półprzewodników III-V [8]. Ten proces fotokorozji pozwala nam wytrawiać german w ultraczystej, dejonizowanej wodzie poprzez naświetlanie germanu za pomocą skupionej wiązki światła o mocy kilku miliwatów, uzyskanej z konwencjonalnego lasera, pracującego w trybie ciągłym. Korzystając z tej metody można wytworzyć dowolne struktury w germanie, na przykład przy użyciu standardowego układu do spektroskopii ramanowskiej. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) struktur wytrawionych w germanie przedstawiono na rysunku 6. Złożono również wniosek patentowy opisujący ten proces selektywnego trawienia.



Rysunek 6: Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego trawionego germanu. (a) Pojedyncza ekspozycja punktowa skutkująca otworami o rozmiarze submikrometrowym (pasek skali: 400 nm). (b) Dwuwymiarowy wzór trawienia uzyskany przez przesuwanie stolika między kolejnymi punktami trawienia (pasek skali: 4 μm). (c) Trójwymiarowe struktury otrzymane przy użyciu różnych czasów naświetlania. Uzyskana struktura przypominająca schody ma głębokość około 10 μm (pasek skali: 5 μm).

Dzięki temu procesowi można selektywnie podtrawić grafen, usuwając wyłącznie znajdujący się pod nim german, jak pokazano schematycznie na rysunku 7 (a). Metoda

ta pozwala nam porównać nienaruszony i podtrawiony grafen na tej samej próbce bez przenoszenia lub dalszego trawienia. Rysunek 7 przedstawia wyniki mapowania widm ramanowskich (d-e) wolnostojącej membrany grafenowej pokazanej w panelu (b) i (c). Na zawieszonym grafenie obserwuje się wzrost sygnału ramanowskiego o rzędy wielkości. Dodatkowe pomiary wykonane in-situ podczas rzeczywistego procesu trawienia pokazują podobny silny wzrost sygnału grafenu [H3].



Rysunek 7: (a) Trójwymiarowa ilustracja układu pomiarowego stosowanego w procesie trawienia. (b) Obraz przekroju poprzecznego skaningowego mikroskopu elektronowego wolnostojącej membrany grafenowej. (c) Obraz z mikroskopu optycznego membrany grafenowej pokazanej na rysunku (b). Skala wynosi 1 μm . (d) Kolorowa mapa pokazująca intensywność piku pasma grafenu 2D. Zielone kółko i fioletowy kwadrat wskazują dwie pozycje, dla których widma ramanowskie są przedstawione w części (e).

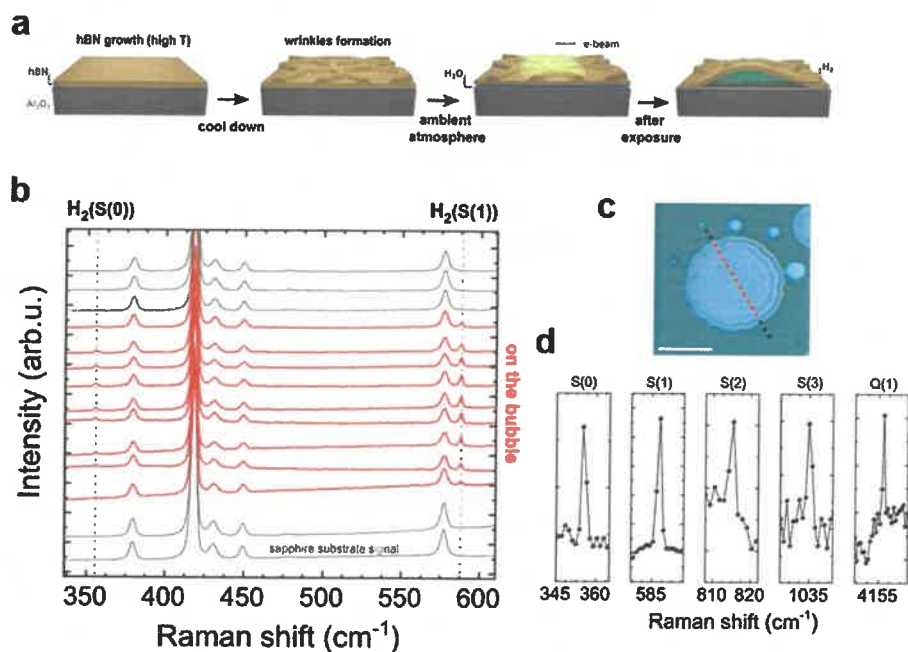
Na podstawie tych wyników możemy stwierdzić, że niska intensywność sygnału ramanowskiego grafenu na germanie nie jest związana z jego jakością, ale jest konsekwencją oddziaływania między grafenem a germanem na interfejsie. Sygnał ramanowski jest wygaszany, ponieważ wzbudzenie jest skutecznie transferowane do podłoża germanowego, które ma znacznie mniejszą przerwę energetyczną niż energia fotonów dla laserów (1,96 eV, 2,33 eV) użytych do mapowania widm ramanowskich.

3. Interfejs materiału 2D z cieczami i gazami [H4]

Trzecia klasa interfejsów jest związana z bardzo powszechną sytuacją, w której materiał 2D jest narażony na działanie cieczy lub gazów w warunkach atmosferycznych. W szczególności rola wody jest kluczowa dla materiałów 2D, nawet jeśli są one stabilne w warunkach laboratoryjnych. Układem, który został użyty do zbadania tego wpływu jest hBN wyhodowany metodą epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE) w naszej grupie badawczej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (Laboratorium Materiałów Warstwowych, prof. Andrzej Wyszomółka, prof. Roman Stępniewski). Materiał jest hodowany w wysokich temperaturach powyżej 1000 °C na podłożach szafirowych. Ponieważ hBN jest materiałem warstwowym, wzrost wysokiej jakości hBN powinien prowadzić do powstania warstwy, która w warunkach idealnych nie ma wiązań kowalencyjnych z podłożem. Ten brak wiązań kowalencyjnych jest ważny dla zrozumienia zachowania epitaksjalnego hBN podczas procesu chłodzenia po wzroście. Sytuacja ta została zilustrowana na rysunku 8 (a). Warstwa hBN nie jest naprężona w temperaturze wzrostu, ale po schłodzeniu szafirowe podłoże kurczy się, a hBN rozszerza się, ponieważ hBN ma ujemny współczynnik rozszerzalności termicznej w płaszczyźnie [9]. Ponieważ warstwa jest słabo związana, indukowany termicznie wzrost naprężeń nie prowadzi do pęknięć, ale do powstawania zmarszczek w warstwie hBN [10].

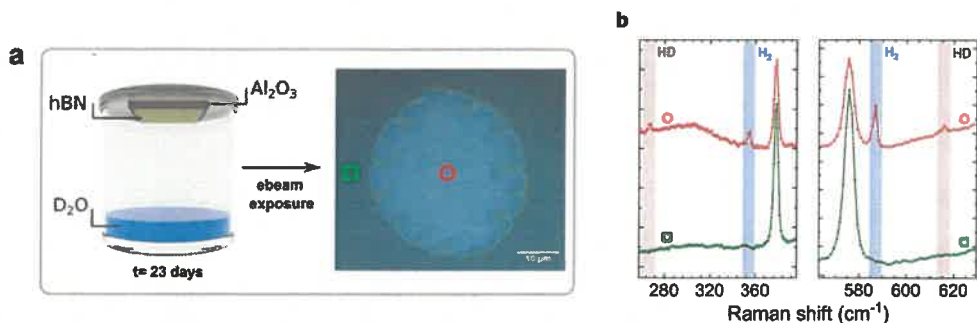
W przypadku takiego epitaksjalnego hBN ze zmarszczkami, zaobserwowaliśmy powstawanie bąbli po naświetlaniu wiązką elektronów wewnątrz Skaningowego Mikroskopu Elektronowego (SEM) podczas obrazowania powierzchni (wideo dostępne online jako informacje uzupełniające do [H4]). Obserwację tę można wyjaśnić efektami ładowania elektrostatycznego, ponieważ zarówno szafir, jak i hBN są izolatorami, lub reakcją chemiczną wywołaną przez wiązkę elektronów. Aby uzyskać więcej informacji o zachodzących procesach, przeprowadziliśmy mapowanie z wykorzystaniem spektroskopii ramanowskiej w skali mikrometrowej wytworzonego w ten sposób bąbla; rys. 8 (b-d). Skanowanie linii w poprzek bąbla wyraźnie pokazuje pojawienie się nowych linii ramanowskich. Linie te są widoczne tylko na bąblu i można je zidentyfikować jako spowodowane wodorem cząsteczkowym, o czym świadczy pięć pasm, które pasują do widma drgań H₂ (rys. 8 (d)) [11]. Wniosek ten rodzi pytanie o źródło obserwowanego wodoru. Zasadniczo istnieją dwie możliwości: (1) H₂ pochodzi albo z wodoru, który jest dostępny podczas wzrostu, z gazu nośnego H₂ lub gazów prekursorowych (NH₃, TEB), albo (2) jest wprowadzany po wzroście poza reaktorem.

Aby rozróżnić te dwie możliwości przeprowadzono eksperyment kontrolny z użyciem ciężkiej wody jako markera spektroskopowego. W tym celu próbkę umieszczono w szczelnym pojemniku z ciężką wodą. Próbkę została zamontowana warstwą do dołu w górnej części pojemnika, aby uniknąć bezpośredniego kontaktu z ciężką wodą (rys. 9 (a)). W ten sposób próbka została wystawiona na działanie atmosfery zawierającej ciężką wodę. Po 23 dniach próbka została wyjęta z pojemnika i przeniesiona do SEM w celu zainicjowania tworzenia bąbli. Po pomyślnym utworzeniu bąbli próbka została zbadana za pomocą spektroskopii ramanowskiej.



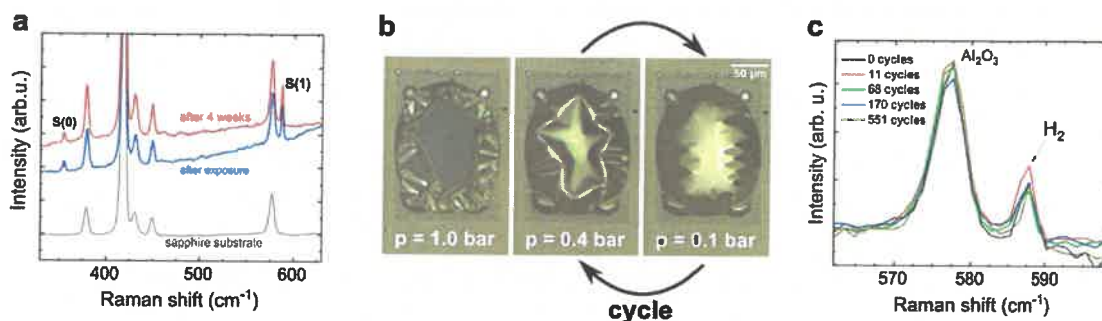
Rysunek 8: (a) Schematyczna ilustracja powstawania bąbli. hBN jest hodowany za pomocą MOVPE w temperaturach powyżej 1000 °C. Po wzroście próbka została schłodzona do temperatury pokojowej, co doprowadziło do powstania zmarszczek w hBN. Próbka jest usuwana z reaktora i wystawiana na działanie warunków atmosferycznych. Naświetlanie wiązką elektronów w SEM prowadzi do powstawania bąbli. (b) Skanowanie widm ramanowskich wzdłuż linii przechodzącej przez bąbel wypełniony wodorem. Wyraźnie widać, że dwie linie są obecne tylko na bąblu. Linie te odpowiadają liniom wodoru cząsteczkowego. (c) Obraz z mikroskopu optycznego badanego bąbla pokazujący plamkę lasera (532 nm). Linia przerywana wskazuje kierunek skanowania linii. (d) Dodatkowe linie drgań zmierzone na bąblu, które nie zostały pokazane w części (b). Możliwe było zidentyfikowanie pierwszych czterech linii S(0)-S(3) przejść (0-0) i linii Q(1) przejść (1-0).

Rysunek 9 (a) przedstawia obraz optyczny bąbla i dwie plamki, które oznaczają odpowiednie widma pokazane w panelu (b). Oprócz linii związanych z H_2 , pojawia się nowy zestaw linii związanych z deuterkiem wodoru (HD), który jest dwuatomowym związkiem dwóch izotopów wodoru (1H : prot i 2H : deuter). Ze względu na niską naturalną obfitość deuteru, możemy wnioskować, że deuter obserwowany w HD pochodzi z ciężkiej wody. Dlatego można stwierdzić, że przynajmniej część obserwowanego wodoru pochodzi z interkalacji wody występującej na interfejsie. Po naświetlania wiązką elektronów dochodzi do radiolizy, co prowadzi do dysocjacji wody i wytworzenia H_2 , który jest skutecznie magazynowany na interfejsie wewnątrz bąbla hBN. Tworzenie się bąbli jest dodatkowo ułatwione przez pomarszczoną powierzchnię warstwy. Tworzenie się bąbli jest jednym ze sposobów na rozluźnienie warstw i skompensowanie naprężeń nagromadzonych w zmarszczkach.



Rysunek 9: (a) Próbka została umieszczona warstwą do dołu w pojemniku wypełnionym ciężką wodą (D_2O) na 23 dni. Następnie próbka została zamontowana w SEM i naświetlona wiązką elektronów w celu utworzenia bąbli, jak pokazano na (a). (b) Widma ramanowskie dwóch typowych punktów na bąblu (obok bąbla) są pokazane jako czerwone (zielone) krzywe. Widmo obok bąbla pokazuje tylko pasma ramanowskie związane z szafirem. W przypadku pomiaru na bąblu można zaobserwować nie tylko sygnał związany z wodorem cząsteczkowym, ale także sygnał związany z deuterkiem wodoru (HD).

Wykazano już, że pojedyncza warstwa BN z jednej strony jest doskonale przepuszczalna dla protonów [12], a z drugiej strony stanowi doskonałą barierę dla cząsteczkowego H_2 [13, 14]. W naszym przypadku dla epitaksjalnego BN, obecność H_2 wewnątrz bąbla została potwierdzona po ponad 4 tygodniach. Po pewnym czasie jednak sygnał ramanowski od H_2 zanikł. Na podstawie tej obserwacji można stwierdzić, że pomimo obecności defektów, nasz epitaksjalny hBN może prawdopodobnie pełnić rolę bariery wodorowej, co otwiera wiele możliwych zastosowań, na przykład w lekkich zbiornikach H_2 . Nie jest jednak jasne, jaki mechanizm powoduje spadek sygnału ramanowskiego. Po radiolizie powstaje nie tylko H_2 , ale także inne produkty reakcji, głównie H_2O_2 [15]. W naszym konkretnym przypadku wszystkie produkty reakcji pozostają zamknięte wewnątrz bąbla hBN. Dlatego mogą wystąpić reakcje odwrotne. Rzeczywiście, takie reakcje odwrotne są jednym z głównych czynników ograniczających produkcję H_2 w procesie radiolizy w czystej wodzie w układach zamkniętych [15]. W związku z tym trudno jest ocenić, czy H_2 wydostaje się z warstwy hBN, czy też zanika w wyniku reakcji odwrotnych. Aby móc wypowiedzieć się na temat mechanicznej przydatności warstw epitaksjalnych do przechowywania H_2 , przeprowadziliśmy test obciążeń mechanicznych. W tym celu wykorzystaliśmy fakt, że bąble tworzą się w SEM w warunkach próżniowych. Jeżeli wyjmie się próbkę z bąblami z SEM, zostaną wystawione na działanie ciśnienia atmosferycznego. W przypadku małych bąbli nie obserwuje się prawie żadnych zmian, ale w przypadku dużych bąbli ciśnienie atmosferyczne prowadzi do spłaszczenia bąbla. W oparciu o ten efekt przeprowadziliśmy automatyczny cykl ciśnieniowy na dużym bąblu (o rozmiarach $\approx 150 \mu m \times 200 \mu m$), który naprzemiennie prowadził do nadmuchania i spłaszczenia bąbla (video dostępne online jako informacje uzupełniające do [H4]). Po określonej liczbie cykli przeprowadzono badania z użyciem spektroskopii ramanowskiej, aby ocenić, czy H_2 jest nadal obecny w bąblu. Nawet po maksymalnej liczbie 551 cykli wodór był obecny w bąblu, co pokazuje, że nasz hBN pozostaje szczelny nawet przy ekstremalnych odkształceniach mechanicznych.



Rysunek 10: (a) Dwa widma ramanowskie zmierzone w tym samym punkcie bąbla bezpośrednio po naświetlaniu wiązką elektronów i po 4 tygodniach. Linie ramanowskie nie zmniejszyły swojej intensywności. Oznacza to, że wodór jest nadal zamknięty w bąblu po 1 miesiącu w warunkach atmosferycznych. Dla porównania pokazano widmo ramanowskie czystego szafirowego podłoża. (b) Obrazy z mikroskopu optycznego dużego bąbla dla różnych ciśnień otoczenia. Bąbel był nadmuchiwany i spłaszczany poprzez automatyczną zmianę ciśnienia w zakresie od 100 do 400 mbar. (c) Po określonej liczbie cykli ciśnienia wykonano pomiary widm ramanowskich. Wodór molekularny był nadal obecny po 551 cyklach.

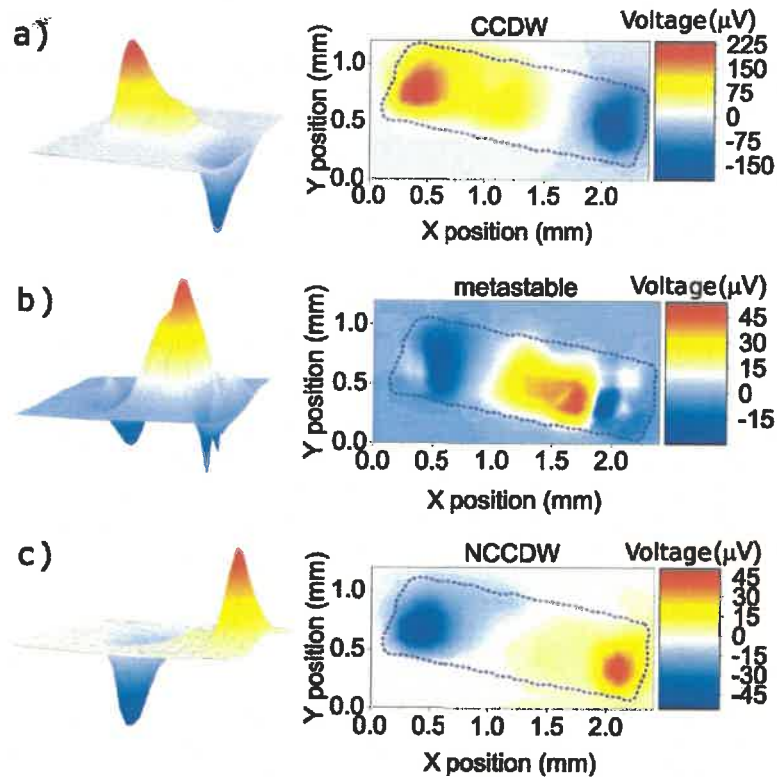
Odkrycia te pokazują, że hBN ma duże perspektywy zastosowań w magazynowaniu wodoru i może pozwolić na rozwój niekonwencjonalnych sposobów wytwarzania wodoru poprzez wykorzystanie reakcji chemicznych zachodzących w zamkniętej nano-przestrzeni na styku hBN i innych materiałów.

4. Interfejs w materiale 2D, który zawiera różne fazy: [H5] i [H6].

Niniejszy rozdział dotyczy "interfejsów" w jednym, warstwowym materiale, a mianowicie dwusiarczku tantalu typu 1T (1T-TaS₂). Ten dichalkogenek metalu przejściowego był intensywnie badany przez wiele dekad i posiada bardzo bogaty diagram fazowy [16]. Można zaobserwować kilka przejść fazowych zależnych od temperatury. Wraz ze spadkiem temperatury, 1T-TaS₂ przechodzi przejście fazowe ($T = 550 \text{ K}$) z fazy metalopodobnej do fazy o niewspółmiernej fali gęstości ładunku. W temperaturze około 350 K następuje kolejne przejście fazowe do fazy prawie współmiernej fali gęstości ładunku (NCCDW), a następnie przejście do fazy współmiernej fali gęstości ładunku (CCDW) w temperaturze około 180 K. Różnym fazom fali gęstości ładunku towarzyszą okresowe deformacje sieci, dla których położenie atomów jest przesunięte, tworząc wzór podobny do gwiazdy Dawida. Te przejścia fazowe były szczegółowo badane w ostatnich dziesięcioleciach przy użyciu wielu różnych technik pomiarowych, takich jak mikroskopia elektronowa [17], skaningowa mikroskopia tunelowa [18, 19], spektroskopia optyczna [20], pomiary właściwości elastycznych [21] i pomiary transportu elektrycznego [22]. Istotną cechą właściwości elektrycznych jest zmiana przewodnictwa z typu n (NCCDW) na typ p (CCDW), co skutkuje również zmianą znaku stałej Seebecka, którą wykorzystaliśmy w naszej pracy [H5].

Obserwacja zmian rezystancji jest jedną z najprostszych metod pomiaru przejścia fazowego między fazami NCCDW i CCDW, stąd też jest szeroko stosowana. Metoda ta ma jednak charakter globalny, ponieważ bada zachowanie całej próbki, nie pozwalając nam na badanie przejścia fazowego z dużą rozdzielczością przestrzenną. Podczas przejścia fazowego można zaobserwować spontaniczne skoki rezystancji, które można przypisać przejściom fazowym części próbki. W takiej sytuacji dwie fazy powinny być obecne w tym samym czasie w próbce, będąc oddzielone interfejsem lub złączem. Taka mieszana faza CCDW (typu p) i NCCDW (typu n) jest bardzo interesująca, ponieważ złącze p-n powinno tworzyć się na styku obszarów różnych faz.

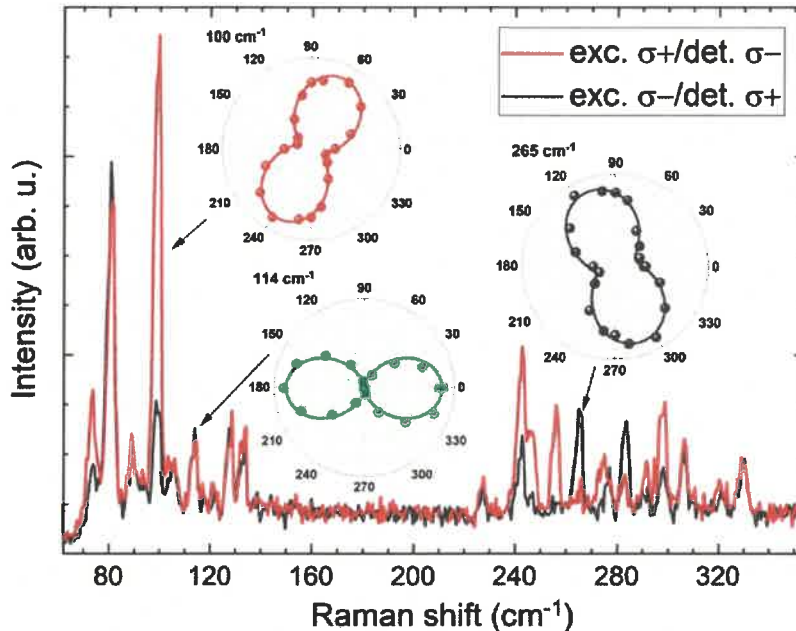
Celem pracy [H5] było zbadanie takich mieszanych stanów za pomocą pomiarów optoelektronicznych, które pozwalają na lokalne badanie próbki za pomocą skupionej plamki lasera (spektroskopia ramanowska na skali mikrometrowej) i globalnie poprzez pomiar rezystancji elektrycznej. Podczas wykonywania tych pomiarów zaobserwowaliśmy silny wpływ naświetlania skupioną wiązką laserową na sygnał elektryczny. Pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych oświetlonych próbek pozwoliły nam stwierdzić, że wiązka lasera indukuje gradient temperatury na próbce, który skutkuje pojawieniem się napięcia termoelektrycznego (efekt Seebecka). Ponieważ laser można przesuwac z submikrometrową precyzją, uzyskaliśmy narzędzie do badania właściwości próbki poprzez przesuwanie wiązki lasera, która działa jak lokalne źródło ciepła na próbce. Gdy obszar w pobliżu kontaktu jest oświetlony, nośniki swobodne oddalają się od niego, tworząc w ten sposób dodatkowe napięcie. Znak tego napięcia zostanie odwrócony, gdy laser zostanie umieszczony w pobliżu przeciwnego kontaktu. Ogólnie rzecz biorąc, znak napięcia termoelektrycznego zależy również od rodzaju nośników większościowych. Ponieważ rodzaj swobodnych nośników ładunku zmienia się podczas przejścia fazowego, zmienia się również współczynnik Seebecka, a zatem otrzymujemy odwrócone znaki napięć termoelektrycznych. Takie zachowanie można zaobserwować porównując rysunek 11 (a) dla fazy CCDW i (c) dla fazy NCCDW. Znak indukowanego napięcia w pobliżu kontaktów jest odwrócony, co ilustruje, że nasza metoda działa zgodnie z oczekiwaniami. Aby zbadać stan mieszany, z interfejsami między fazami CCDW i NCCDW, wykonaliśmy mapowanie napięcia termoelektrycznego indukowanego laserowo podczas przejścia fazowego. Obserwując zmiany rezystancji możemy śledzić postęp przejścia fazowego. Udało nam się wykazać, że stany mieszane można ustabilizować poprzez obniżenie temperatury (o około 3 K) w trakcie zachodzenia przejścia fazowego. Przestrzenna mapa napięcia termoelektrycznego dla takiego „przerwanego przejścia” jest pokazana na rysunku 11 (b). Można zauważyć, że reakcja ta bardzo się różni od tej uzyskanej dla faz CCDW (rys. 11 (a)) i NCCDW (rys. 11 (c)). Dla fazy metastabilnej uzyskujemy maksima napięcia termoelektryczne w środku próbki (rys. 11 (b)). Wykazaliśmy, że takie stany są stabilne przez kilka godzin, dając ten sam rozkład dla kolejnych map napięcia termoelektrycznego. Poprzez nieznaczne zwiększenie temperatury przejście fazowe jest kontynuowane, a późniejsze obniżenie temperatury ponownie przerywa przejście fazowe, umożliwiając badanie innego stanu mieszanego. Opracowana przez nas metoda mapowania napięcia termoelektrycznego indukowanego laserem potwierdza zatem obecność interfejsów między dwiema fazami gęstości ładunku w 1T-TaS₂.



Rysunek 11: Indukowane laserowo mapy napięcia termoelektrycznego uzyskane dla (a) stanu CCDW w $T=140$ K, (b) stanu metastabilnego próbki podczas przerywanego przejścia fazowego NCCDW-CCDW w $T=215$ K, (c) stanu NCCDW w $T=230$ K.

W publikacji [H6] zajmujemy się innym interfejsem, który może pojawić się nawet w obrębie jednej fazy. Zastosowaliśmy spektroskopię ramanowską na skali mikrometrowej z detekcją polaryzacji do zbadania symetrii obserwowanych modów ramanowskich w niskotemperaturowej fazie CCDW. Nasze pomiary wykazały, że grupy punktowe, które zostały opisane w literaturze, nie mogą wyjaśnić obserwowanego zachowania, w szczególności niepodatności sygnału ramanowskiego na obrót próbki. Antysymetryczny tensor ramanowski jest potrzebny do wyjaśnienia obserwowanego zachowania. Takie tensory ramanowskie są również wykorzystywane do wyjaśnienia efektu ramanowskiej aktywności optycznej dla rozpraszania światła na molekułach, co pozwala na badanie chiralności cząsteczek w materiale biologicznym [23]. Kwestia, czy związek z falą gęstości ładunku 1T-TaS₂ jest chiralny jest trudna do oceny. W przeciwieństwie do standardowych pomiarów aktywności optycznej, nie można po prostu zmierzyć transmisji w świetle spolaryzowanym, ponieważ materiał jest nieprzezroczysty. W naszej pracy jesteśmy w stanie pokazać, że można wykorzystać kołowo spolaryzowane wzbudzenie i detekcję do pomiaru ramanowskiej aktywności optycznej 1T-TaS₂. Rysunek 12 przedstawia takie wyniki. Można zaobserwować trzy rodzaje linii ramanowskich. Pierwszy zestaw linii jest bardziej intensywny dla wzbudzenia z wykorzystaniem światła o polaryzacji σ^+ i detekcji dla polaryzacji σ^- . Drugi zestaw linii jest bardziej intensywny dla przeciwnego schematu wzbudzenia i detekcji, a trzeci zestaw linii nie reaguje na

polaryzację światła. Różne reakcje na światło spolaryzowane kołowo wskazują, że 1T-TaS₂ wykazuje ramanowską aktywność optyczną i jest rzeczywiście chiralny. Wynik ten stoi w sprzeczności z poprzednimi badaniami, które nie wykazały chiralności w czystych próbkach 1T-TaS₂ [24, 25]. Warto wspomnieć, że nasze wyniki zostały już powtórzone przez dwie niezależne grupy, które znalazły taką samą odpowiedź w pomiarach ramanowskich [26, 27].



Rysunek 12: Widma rozpraszania ramanowskiego objętościowego kryształu 1T-TaS₂ uzyskane w $T = 5$ K, z wykorzystaniem światła spolaryzowanego kołowo w konfiguracjach $\sigma +/\sigma -$ i $\sigma -/\sigma +$, gdzie $\sigma +$ ($\sigma -$) oznacza prawoskrętne (lewoskrętne) światło spolaryzowane kołowo. Wstawki pokazują zależności kątowe polaryzacji liniowej trzech linii o energiach odpowiednio 100, 114 i 265 cm^{-1} .

Chociaż nie opisano tego dla czystego stanu CCDW, zaobserwowano oznaki chiralności w postaci przeplatających się obszarach chiralnego uporządkowania w obrazach skaningowej mikroskopii tunelowej dla tak zwanego "ukrytego" stanu w 1T-TaS₂ [28]. Takie ukryte stany metastabilne zaobserwowano w 1T-TaS₂ po impulsowym wzbudzeniu laserowym [29, 30]. Nowsze prace pokazują, że nawet niekoherentne oświetlenie białym światłem może mieć silny wpływ na 1T-TaS₂ prowadząc do zmiany ułożenia superkomórek CCDW w kolejnych warstwach [31]. Uważamy, że poprzez pomiary ramanowskie (światło laserowe) wpływamy na materiał w obrębie plamki lasera, co może prowadzić do powstania złącza (interfejsu) między nienaruszonym obszarem (ciemny obszar) a zmodyfikowanym obszarem (plamka lasera). Oświetlony obszar może wykazywać inny układ i inne właściwości podobne do tych w przypadku stanu ukrytego. Oświetlenie może odgrywać fundamentalną rolę w opisie obserwowanych efektów i oczywiste jest, że potrzebne są dalsze prace łączące różne techniki pomiarowe, aby bardziej szczegółowo zrozumieć zachodzący proces. Jednak wyniki przedstawione dla 1T-TaS₂ sugerują, że interfejsy indukowane przez

ekspozycję na światło mogą również pojawiać się w obrębie pojedynczej fazy w pojedynczym, warstwowym materiale.

Prezentowany cykl publikacji, poświęcony interfejsom wewnątrz materiałów warstwowych oraz z innymi materiałami warstwowymi pozwolił na zbadanie szerokiego zakresu zjawisk, które podkreślają nie tylko możliwości, ale także wyzwania pojawiające się przy tworzeniu nowych koncepcji opartych na heterostrukturach van der Waalsa. Możliwe było odkrycie następujących efektów związanych z procesami fizycznymi na interfejsach:

- tunelowanie nośników ładunku bezpośrednio do stanów ekscytonowych;
- oscylacje elektroluminescencji w polu magnetycznym spowodowane kwantyzacją Landaua w grafenowych elektrodach heterostruktur vdW;
- tworzenie, zasilanie elektryczne i obserwacja ekscytonów międzywarstwowych w heterostrukturach vdW;
- konwersja energii emisji elektroluminescencji w górę poprzez efekt Augera dla ekscytonów międzywarstwowych;
- podtrawienie materiałów 2D przez fotokorozję germanu;
- wygaszanie sygnału ramanowskiego dla grafenu na germanie;
- radioliza wody i wytwarzanie wodoru na interfejsie szafir / hBN;
- obecność metastabilnych stanów fali gęstości ładunku w 1T-TaS₂ i możliwość ich tworzenia oraz mapowania przestrzennego z wykorzystaniem indukowanego światłem efektu Seebecka
- możliwość tworzenia indukowanych światłem interfejsów i potwierdzenie chiralności 1T-TaS₂ z wykorzystaniem ramanowskiej aktywności optycznej.

Referencje:

- [1] Geim, A. and Grigorieva, I. *Nature* **499**(7459), 419–425 (2013).
- [2] Withers, F., Del Pozo-Zamudio, O., Mishchenko, A., Rooney, A. P., Gholinia, A., Watanabe, K., Taniguchi, T., Haigh, S. J., Geim, A. K., Tartakovskii, A. I., and Novoselov, K. S. *Nature Materials* **14**(3), 301–306 (2015).
- [3] He, K., Kumar, N., Zhao, L., Wang, Z., Mak, K. F., Zhao, H., and Shan, J. *Physical Review Letters* **113**(2), 026803 (2014).
- [4] Zhang, C., Chen, Y., Johnson, A., Li, M.-Y., Li, L.-J., Mende, P. C., Feenstra, R. M., and Shih, C.-K. *Nano Letters* **15**(10), 6494–6500 (2015).
- [5] Lee, J.-H., Lee, E. K., Joo, W.-J., Jang, Y., Kim, B.-S., Lim, J. Y., Choi, S.-H., Ahn, S. J., Ahn, J. R., Park, M.-H., et al. *Science* **344**(6181), 286–289 (2014).
- [6] Sitek, J., Pasternak, I., Grzonka, J., Sobieski, J., Judek, J., Dabrowski, P., Zdrojek, M., and Strupinski, W. *Applied Surface Science* **499**, 143913 (2020).
- [7] Persichetti, L., De Seta, M., Scaparro, A., Miseikis, V., Notargiacomo, A., Ruocco, A., Sgarlata, A., Fanfoni, M., Fabbri, F., Coletti, C., et al. *Applied Surface Science* **499**, 143923 (2020).

- [8] Ruberto, M. N., Zhang, X., Scarmozzino, R., Willner, A. E., Podlesnik, D. V., and Osgood, R. M. *Journal of The Electrochemical Society* **138**(4), 1174 (1991).
- [9] Paszkowicz, W., Pelka, J. B., Knapp, M., Szyszko, T., and Podsiadlo, S. *Applied Physics A* **75**(3), 431–435 (2002).
- [10] Iwanski, J., Tatarczak, P., Tokarczyk, M., Dabrowska, A. K., Pawlowski, J., Binder, J., Kowalski, G., Stepniewski, R., and Wysmolek, A. *Nanotechnology* **34**(1), 015202 (2022).
- [11] Veirs, D. K. and Rosenblatt, G. M. *Journal of molecular spectroscopy* **121**(2), 401–419 (1987).
- [12] Hu, S., Lozada-Hidalgo, M., Wang, F. C., Mishchenko, A., Schedin, F., Nair, R. R., Hill, E. W., Boukhvalov, D. W., Katsnelson, M. I., Dryfe, R. A. W., Grigorieva, I. V., Wu, H. A., and Geim, A. K. *Nature* **516**(7530), 227–230 (2014).
- [13] He, L., Wang, H., Chen, L., Wang, X., Xie, H., Jiang, C., Li, C., Elibol, K., Meyer, J., Watanabe, K., Taniguchi, T., Wu, Z., Wang, W., Ni, Z., Miao, X., Zhang, C., Zhang, D., Wang, H., and Xie, X. *Nature Communications* **10**(1), 2815 (2019).
- [14] Blundo, E., Surrente, A., Spirito, D., Pettinari, G., Yildirim, T., Chavarin, C. A., Baldassarre, L., Felici, M., and Polimeni, A. *Nano Lett.* **22**(4), 1525–1533 (2022).
- [15] Le Caër, S. *Water* **3**(1), 235–253 (2011).
- [16] Wilson, J., Salvo, F. D., and Mahajan, S. *Adv. Phys.* **24**(2), 117–201 (1975).
- [17] Ishiguro, T. and Sato, H. *Phys. Rev. B* **44**(5) 08 (1991).
- [18] Lutsyk, I., Rogala, M., Dabrowski, P., Krukowski, P., Kowalczyk, P. J., Busiakiewicz, A., Kowalczyk, D. A., Lacinska, E., Binder, J., Olszowska, N., Kopciuszynski, M., Szalowski, K., Gmitra, M., Stepniewski, R., Jalochocki, M., Kolodziej, J. J., Wysmolek, A., and Klusek, Z. *Phys. Rev. B* **98**, 195425 Nov (2018).
- [19] Dai, J., Calleja, E., Alldredge, J., Zhu, X., Li, L., Lu, W., Sun, Y., Wolf, T., Berger, H., and McElroy, K. *Phys. Rev. B* **89**, 165140 (2014).
- [20] Albertini, O., Zhao, R., McCann, R., Feng, S., Terrones, M., Freericks, J., Robinson, J., and Liu, A. *Physical Review B* **93** 11 (2015).
- [21] Suzuki, A., Yamamoto, R., Doyama, M., Mizubayashi, H., Okuda, S., Endo, K., and Gonda, S. *Solid State Commun.* **49**(12), 1173 – 1176 (1984).
- [22] Inada, Onuki, and Tanuma. *Physica B+C* **99** 01 (1980).
- [23] Barron, L. D. and Buckingham, A. D. *Annu. Rev. Phys. Chem.* **26**(1), 381–396 (1975).
- [24] Ishioka, J., Liu, Y. H., Shimatake, K., Kurosawa, T., Ichimura, K., Toda, Y., Oda, M., and Tanda, S. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 176401 (2010).

- [25] Gao, J. J., Zhang, W. H., Si, J. G., Luo, X., Yan, J., Jiang, Z. Z., Wang, W., Lv, H. Y., Tong, P., Song, W. H., Zhu, X. B., Lu, W. J., Yin, Y., and Sun, Y. P. *Appl. Phys. Lett.* **118**(21), 213105 (2021).
- [26] Yang, H. F., He, K. Y., Koo, J., Shen, S. W., Zhang, S. H., Liu, G., Liu, Y. Z., Chen, C., Liang, A. J., Huang, K., Wang, M. X., Gao, J. J., Luo, X., Yang, L. X., Liu, J. P., Sun, Y. P., Yan, S. C., Yan, B. H., Chen, Y. L., Xi, X., and Liu, Z. K. *Phys. Rev. Lett.* **129**, 156401 (2022).
- [27] Zhao, Y., Nie, Z., Hong, H., Qiu, X., Han, S., Yu, Y., Liu, M., Qiu, X., Liu, K., Meng, S., Tong, L., and Zhang, J. *Nature Communications* **14**(1), 2223 (2023).
- [28] Gerasimenko, Y. A., Karpov, P., Vaskivskiy, I., Brazovskii, S., and Mihailovic, D. *npj Quantum Materials* **4**(1), 32 (2019).
- [29] Stojchevska, L., Vaskivskiy, I., Mertelj, T., Kusar, P., Svetin, D., Brazovskii, S., and Mihailovic, D. *Science* **344**(6180), 177–180 (2014).
- [30] Vaskivskiy, I., Gospodaric, J., Brazovskii, S., Svetin, D., Sutar, P., Goreshnik, E., Mihailovic, I. A., Mertelj, T., and Mihailovic, D. *Sci. Adv.* **1**(6) (2015).
- [31] Li, W. and Naik, G. V. *Nano Lett.* **20**(11), 7868–7873 (2020).

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

Przed uzyskaniem stopnia doktora byłem aktywny naukowo na następujących czterech uniwersytetach:

- i. *Uniwersytet w Tybindze, Niemcy (praca magisterska)*
Tytuł magistra uzyskałem na Wydziale Fizyki Stosowanej Uniwersytetu w Tybindze w grupie prof. Dietera Kleina. Moja działalność koncentrowała się głównie na technikach przetwarzania półprzewodników (urządzenia clean room), wzroście nanorurek węglowych za pomocą chemicznego osadzania z fazy gazowej ze wspomaganiami plazmowym (PECVD) oraz pomiarach prądów emisji polowej w ultrawysokiej próżni (UHV).
- ii. *Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Polska (praca doktorska)*
Po uzyskaniu tytułu magistra w Tybindze otrzymałem stypendium w ramach "Międzynarodowych projektów doktoranckich (MPD)" Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Moja praca koncentrowała się na GaN i grafenie dla możliwych przyszłych zastosowań sensorycznych.

- iii. *Australijski Uniwersytet Narodowy, Canberra, Australia (5 miesięcy)*
Podczas pobytu badawczego w Canberze w ramach "Międzynarodowych projektów doktoranckich (MPD)" Fundacji na rzecz Nauki Polskiej pracowałem nad implantacją jonową węgla w strukturach GaN HEMT w celu utworzenia kanałów izolacyjnych oraz implantacją jonową azotu w SiC pokrytym grafenem (próbki epitaksjalne) w celu uzyskania obszarów domieszkowanych na typ n. Te ostatnie eksperymenty pozwoliły na wytworzenie wewnętrznej bramki, która umożliwiła dostrojenie koncentracji nośników ładunku w grafenie, o czym świadczą zmiany w oscylacjach Shubnikova-de Haasa mierzone w Warszawie. Wyniki te stały się częścią mojej pracy doktorskiej.
- iv. *Narodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, Grenoble, Francja (3 miesiące)*
Podczas mojego pierwszego pobytu badawczego w Grenoble przeprowadziłem eksperymenty z wykorzystaniem spektroskopii ramanowskiej w polu magnetycznym na płatkach grafenu naturalnie występujących na graficie. Uzyskane wyniki stały się częścią mojej pracy doktorskiej i zostały opublikowane w dwóch artykułach (EPL i 2D Materials).

Po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora podjąłem pracę jako post-doc w CNRS w Grenoble

- *post-doc - Narodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, Grenoble, Francja (12 miesięcy)*
Od początku maja 2015 r. do końca kwietnia 2016 r. byłem członkiem zespołu prof. Marka Potemskiego na stanowisku finansowanym przez program Graphene Flagship Unii Europejskiej. Podczas mojego pobytu pracowałem głównie nad elektroluminescencją nowych heterostruktur van der Waalsa we współpracy z grupą laureata Nagrody Nobla prof. Konstantina Novoselova z Uniwersytetu w Manchesterze. W tym czasie zaobserwowałem wiele nowych efektów, które zostały opisane bardziej szczegółowo w punkcie 4 i publikacjach [H1] i [H2].

Wizyty badawcze

- Laboratoire Charles Coulomb, CNRS, Montpellier, Francja
Grupa badawcza: prof. Guillaume Cassabois, prof. Bernard Gil
Okres pobytu: 13.2-18.2.2022
Pomiary optyczne naszych próbek heksagonalnego azotku boru w zakresie głębokiego ultrafioletu
- Narodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, CNRS, Grenoble, Francja
Grupa badawcza: prof. Marek Potemski
Okres pobytu: 25.06.2017 - 02.07.2017

Pomiary fotoluminescencji i elektroluminescencji heterostruktur van der Waalsa wspólnie z członkami grupy prof. Novoselova

- o Narodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, CNRS, Grenoble, Francja
Grupa badawcza: prof. Marek Potemski
Okres pobytu: 12.2.2017-25.2.2017
Pomiary fotoluminescencji i elektroluminescencji heterostruktur van der Waalsa wspólnie z członkami grupy prof. Novoselova

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Poniższa lista osiągnięć odpowiada okresowi od 2016 roku (stanowisko adiunkta na Uniwersytecie Warszawskim)

Prowadzone zajęcia

Wykłady:

Studia I stopnia:

- Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej (część dotycząca fizyki materii skondensowanej)
- Fizykochemia w Kryminalistyce (Mikroskopia elektronowa w kryminalistyce, spektroskopia ramanowska i luminescencja)

Ćwiczenia:

Studia I stopnia:

- Fizyka z matematyką I, ćwiczenia

Studia II stopnia:

- Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej (część dotycząca fizyki materii skondensowanej)
- Low-dimensional systems and nanostructures

Pracownie:

Studia I stopnia:

- Pracownia fizyczna i elektroniczna (w tym komputerowa)

Studia II stopnia:

- Analiza fizykochemiczna wybranych substancji
- Pracownia Fizyczna II stopnia
- Zaawansowana pracownia Inżynierii Nanostruktur
- III Pracownia półprzewodnikowa
- Indywidualna praca w laboratorium badawczym

Pokazy do wykładów:

Studia I stopnia:

- Podstawy fizyki IV
- Termodynamika z elementami fizyki statystycznej

Inne:

Studia II stopnia:

- Proseminarium fizyki półprzewodników (nadzór nad studentami)
- Staż podyplomowy w naszym laboratorium

Nadzór nad pracami doktorskimi, magisterskimi i licencjackimi

Prace doktorskie (promotor pomocniczy):

1. Jakub Kierdaszuk: *"Badanie procesów rozpraszania w grafenie na podłożu z nanodrutów"* (data nadania stopnia doktora: 07.02.2022)
2. Ewa Łacińska: *"Wpływ przejść fazowych na właściwości optyczne i elektryczne 1T-TaS₂"* (data obrony doktorskiej: 04.07.2023)
3. Piotr Kaźmierczak: *"Modyfikacja właściwości struktur grafenowych i generacja sygnałów elektrycznych pod wpływem przepływu roztworów wodnych"* (w toku)
4. Katarzyna Ludwiczak: *"Nowe epitaksjalne heterostruktury 2D: w kierunku skali waflowej"* (w toku)
5. Jakub Rogoża: *"Epitaksjalny azotek boru - platforma dla detektorów i emiterów światła głębokiego ultrafioletu"* (w toku)
6. Piotr Tatarczak: *"Emitory pojedynczych fotonów i mikrownęki optyczne oparte na epitaksjalnym azotku boru - nowe podejście"* (w toku)

Prace magisterskie:

1. Batrosz Danilewicz: *Spektroskopia ramanowska lakierów samochodowych (w toku)*
2. Leonid Tkachenko: *Analiza morfologii powierzchni epitaksjalnych warstw heksagonalnego azotku boru z wykorzystaniem metod rozpoznawania obrazów (2021) współopiekun: dr hab. Artur Kalinowski, prof. UW*
3. Emma Grodzicka: *Emisja pojedynczych fotonów w epitaksjalnym heksagonalnym azotku boru (2020)*

4. Katarzyna Ludwiczak: *Badania optyczne i pasywacja wybranych materiałów warstwowych* (2020)
5. Katarzyna Konieczna: *Badania pozostałości powystrałowych metodą spektroskopii ramanowskiej* (2020)
6. Jakub Rogoża: *Badania spektroskopii ramanowskiej grafenu wyhodowanego na germanie oraz wytwarzanie membran grafenowych metodą fotokorozji* (2020), współopiekun: prof. dr hab. Andrzej Wysmołek
7. Maksymilian Wojtczak: *Podłoża do bramkowania materiałów dwuwymiarowych z wykorzystaniem struktur azotek boru/węglik boru hodowanych metodą MOVPE* (2020) współopiekun: prof. dr hab. Andrzej Wysmołek

Prace licencjackie:

1. Katarzyna Ludwiczak: *Badania elektrooptyczne przejść fazowych w TaS₂* (2019)
2. Maksymilian Wojtczak: *Charakteryzacja optyczna i elektryczna domieszkowanych warstw epitaksjalnych azotku boru* (2019), współopiekun: prof. dr hab. Andrzej Wysmołek
3. Katarzyna Rogoża: *Badanie grafenu płatkowego i jego pochodnych* (2017) współopiekun: prof. dr hab. Andrzej Wysmołek

Popularyzacja nauki

- o Komunikaty prasowe:
 - *Exciting Optoelectronic Properties Of Stacks Of Two-Dimensional Crystals*, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (16.9.2019) <https://www.photonicsonline.com/doc/exciting-optoelectronic-properties-of-stacks-of-two-dimensional-crystals-0001>
 - *Manchester researchers demonstrate low voltage LEDs*,, University of Manchester (1.8.2019) <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/manchester-researchers-demonstrate-low-voltage-leds/>
- o Radio Kampus: Wywiad na temat publikacji w Nature Communications: "Upconverted electroluminescence via Auger scattering of interlayer excitons in van der Waals heterostructures", 25.6.2019 r.
- o Warsztaty: "Z laserem w kryształ 2D", Dzień Otwarty na Kampusie Ochota 2018 r.

- Warsztaty: "Z laserem w grafen i inne materiały 2D", Dzień Otwarty na Kampusie Ochota 2017 r.

Osiągnięcia organizacyjne

- Kierownik laboratorium litograficznego i pomieszczeń czystych:
 - Uruchomienie i zarządzanie infrastrukturą Zakładu Fizyki Ciała Stałego Wydziału Fizyki w budynku CeNT I
 - Kierowanie powiązaniem grantem SPUB
- Chairman Międzynarodowej Szkoły w ramach "Jaszowiec International School & Conference on the Physics of Semiconductors". Członek komitetu programowego i organizacyjnego. Wydania:
 - 49. "Jaszowiec 2021", 1.9.-10.9.2021 r.
 - 48. "Jaszowiec 2019", 8.6.-14.6.2019 r.
- Członek Rady Wydziału (11.2016 - obecnie)

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej

Nagrody

- Nagroda dla wybitnego recenzenta 2021 dla czasopisma: 2D Materials
- Nagroda "IOP trusted reviewer" (2020)
- Nagroda zespołowa za osiągnięcia naukowe przyznawana przez Rektora Uniwersytetu Warszawskiego (2022)
- Nagroda indywidualna za osiągnięcia naukowe (III stopnia) przyznana przez Rektora Uniwersytetu Warszawskiego (2017)

Stypendia

- 2010-2014 - stypendium doktoranckie w ramach "Międzynarodowych projektów doktoranckich" (MPD) Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP) współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego UE
- Stypendium Rządu Rzeczypospolitej Polskiej


.....
(podpis wnioskodawcy)