

Załącznik 3a

AUTOREFERAT

dr Paweł Krukowski

Katedra Fizyki Ciała Stałego
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Łódzki



Łódź, wrzesień 2023

Spis treści

1. Imię i nazwisko:.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	4
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.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.	5
4.1 Modyfikacja pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych	18
4.2 Wytwarzanie oraz charakteryzacja samoorganizujących się wysp z CrN na powierzchni Cu(001).....	22
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej. 22	
5.1 Staż naukowy w Institute for Molecules and Materials, Radboud University of Nijmegen, The Netherlands.....	22
5.2 Staż podoktorski (Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Japan).....	24
5.3 Zatrudnienie na stanowisku <i>Specjalnie Wyznaczony Badacz</i> (Department of Precision Science and Technology, Osaka University, Japan).....	26
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	29
6.1 Osiągnięcia dydaktyczne.....	29
6.2 Osiągnięcia organizacyjne.....	32
6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę	33
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	34
7.1 Udział w szkołach letnich	34
7.2 Udział w kursach.....	35
7.3 Nagrody, stypendia i wyróżnienia.....	35
LITERATURA	36

1. Imię i nazwisko:

Paweł Krukowski

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

2017 – 2018 **MBA dla branży IT**, studia podyplomowe - Master of Business Administration, Polsko-Japońska Akademia Technik Komputerowych w Warszawie, Wydział Informatyki. Studia ukończone w dniu 10.07.2018

2004 – 2009 **Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki**, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Stopień naukowy uzyskany w dniu 23.09.2009, **Tytuł dysertacji:** *Badania warstw molekuł organicznych zawierających stabilne wolne rodniki osadzonych na podłożu Au(111) i HOPG(0001)*. Praca wykonana w Katedrze Fizyki Ciała Stałego.

Promotor: dr hab. Wielisław Olejniczak, prof. UŁ

Recenzent: prof. dr hab. Janusz Baszyński, Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk

Recenzent: prof. dr hab. Henryk Scholl, Uniwersytet Łódzki, Wydział Chemii

1999 – 2004 **Magister fizyki w zakresie fizyki doświadczalnej**, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Chemii, Katedra Fizyki Ciała Stałego, Tytuł zawodowy uzyskany w dniu 07.07.2004, **Tytuł pracy:** *Badanie rezonansu spinowo-elektronowego w skali molekularnej*.

Promotor: dr hab. Wielisław Olejniczak, prof. UŁ

Recenzent: dr Sławomir Pawłowski

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

- 05/2022 – teraz** *Adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych*, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Fizyki Ciała Stałego, (Kierownik dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ)
- 05/2018 – 05/2022** *Adiunkt naukowy*, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Fizyki Ciała Stałego, (Kierownik prof. dr hab. Zbigniew Klusek, dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ)
- 05/2017 – 04/2018** *Adiunkt naukowy*, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Fizyki Ciała Stałego, (Kierownik prof. dr hab. Zbigniew Klusek)
- 12/2016 – 05/2017** *Fizyk w grupie pracowników naukowo-technicznych*, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Fizyki Ciała Stałego, (Kierownik prof. dr hab. Zbigniew Klusek)
- 04/2013 – 03/2016** *Specially Appointed Researcher*, Osaka University, Department of Precision Science and Technology, Japan, (Kierownik prof. Yuji Kuwahara)
- 10/2010 – 10/2012** *Postdok* w ramach stypendium „JSPS Postdoctoral Fellowships for Foreign Researchers”, The University of Tokyo, Institute for Solid State Physics, Japan, (Kierownik prof. Fumio Komori)
- 10/2009 – 06/2010** *Nauczyciel fizyki*, VIII Liceum Ogólnokształcące im. Adama Asnyka w Łodzi

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.).

Jako osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego zgodnie z 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.) wskazuję na cykl 6 powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Tematyka cyklu:

Chiralne molekuly na podłożach metalicznych: badania w nanoskali

Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego:

(Na poniższej liście za pomocą symbolu „*” oznaczony został autor korespondencyjny publikacji, natomiast liczba cytowań została określona według bazy Web of Science Core Collection z dnia 18.08.2023).

- [H1] P. Krukowski*, T. Hattori, M. Okada, M. Piskorski, I. Lutsyk, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Study of Stereochemical Crystallization of Racemic Mixtures of [5] and [7]thiaheterohelicene Molecules on Ag(111) Surface by Scanning Tunneling Microscopy and Raman Scattering Spectroscopy*, Applied Surface Science 589 (2022) 152860, IF: 6.7 (2022), Punktacja MEiN: 140 (wykaz z 21.12.2021), cytowania - 2
- [H2] P. Krukowski*, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Adsorption and Light Emission of a Racemic Mixture of [7]thiaheterohelicene-2,13-carboxaldehyde on Au(111), Cu(001), and NiAl(110) Surfaces Investigated Using a Scanning Tunneling Microscope*, Journal of Physical Chemistry C 125 (2021) 9419, IF: 4.177 (2021), Punktacja MEiN: 140 (wykaz z 21.12.2021), cytowania - 6
- [H3] S. Chaunchaiyakul*, A. Setiadi, P. Krukowski, F.C.I. Catalan, M. Akai-Kasaya, A. Saito, N. Hayazawa, Y. Kim, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Nanoscale Dehydrogenation Observed by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy*, Journal of Physical Chemistry C 121 (2017) 18162, IF: 4.484 (2017), Punktacja MNiSW: 35 (na podstawie wykazu scalonego 2013-2016), cytowania - 17

- [H4] S. Chaunchaiyakul, P. Krukowski, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara*, *Self-Assembly Formation of M-Type Enantiomer of 2,13-Bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules on Au(111) Surface Investigated by STM/CITS*, Journal of Physical Chemistry C 119 (2015) 21434, IF: 4.509 (2015), Punktacja MNiSW: 35 (2015), cytowania - 10
- [H5] P. Krukowski*, T. Hattori, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Light Emission from M-Type Enantiomer of 2,13-bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules Adsorbed on Au(111) and C₆₀/Au(111) Surfaces Investigated by STM-LE*, International Journal of Molecular Sciences 23 (2022) 15399, IF: 5.6 (2022), Punktacja MEiN: 140 (wykaz z 21.12.2021)
- [H6] P. Krukowski*, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, N. Yajima, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, Y. Miyake, Y. Kuwahara, *Detection of Light Emission from (S)-PTCDI Molecules Adsorbed on Au(111) and NiAl(110) Surfaces Induced by a Scanning Tunneling Microscope*, Journal of Physical Chemistry C 120 (2016) 3964, IF: 4.536 (2016), Punktacja MNiSW: 35 (2016), cytowania - 14

Wprowadzenie do badań

Chiralność jest to własność geometryczna nierozłącznie związana z symetrią obiektu polegająca na tym, że dany obiekt jest nienakładalny na swoje odbicie lustrzane. Chiralność bardzo szeroko występuje zarówno w świecie ożywionym jak i nieożywionym odgrywając kluczową rolę w różnorodnych procesach występujących w naturze [1,2]. Badania chiralności w nanoskali na poziomie molekularnym, w tym za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego STM (ang. *Scanning Tunneling Microscope*), są kluczowe do lepszego zrozumienia fundamentalnych praw, które rządzą takimi procesami jak rozpoznawanie molekularne, spontaniczna segregacja czy też enancjoselektywność. Z całą pewnością badania chiralności na poziomie molekularnym mogą przyczynić się także do wyjaśnienia fundamentalnych pytań dotyczących zrozumienia istoty życia.

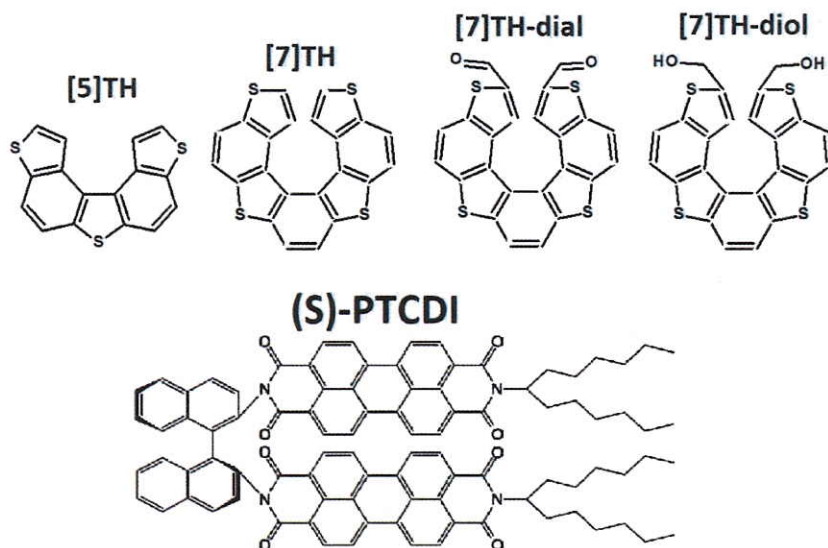
Heliceny należą do grupy molekuł o helikalnie skręconej strukturze zbudowanej z π -sprzężonych pierścieni aromatycznych w wyniku czego wykazują chiralność. Jest to przykład chiralności osiowej, w której nie występuje centrum chiralności w postaci asymetrycznego atomu w budowie szkieletu molekuly. Molekuły heliceny kształtem przypominają lewo lub prawoskrętną sprężynę zbudowaną w oparciu o pierścienie aromatyczne. Historia badań molekuł heliceny sięga już ponad 100 lat ze względu na fascynujące właściwości fizyczne i chemiczne [3–5]. Aby pokazać, że badania które prezentuję w

moim cyklu stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych muszę omówić dotychczasowe badania molekuł helicycy za pomocą mikroskopii STM. W literaturze naukowej najlepiej scharakteryzowano molekułę heptahelicycy (karbo[7]helicycy), zawierającą siedem pierścieni benzenowych. Molekuła heptahelicycy zaadsorbowana na podłożu metalicznym, w tym szczególności na powierzchni Cu(111), jest swego rodzaju układem modelowym, który służy do wyjaśniania procesów rozpoznawania molekularnego oraz procesów spontanicznej segregacji poszczególnych enancjomerów na poziomie molekularnym [6–20]. W szczególności w literaturze pokazano, że dla mieszaniny racemicznej heptahelicycy nie obserwuje się spontanicznej segregacji poszczególnych enancjomerów na powierzchni Cu(111) ani tworzenia się homochiralnych domen molekularnych [8]. Obserwowano natomiast dla mieszaniny racemicznej heptahelicycy na Cu(111) warstwy samoorganizujące składające się z podwójnych rzędów molekularnych typu zig-zag, w skład których wchodziły na przemian występujące enancjomery heptahelicycy [7,8]. Natomiast w przypadku badań czystego enancjomeru heptahelicycy na Cu(111) odnotowano przeniesienie chiralności z pojedynczej molekuly do samoorganizującej się monowarstwy [10]. Dalsze eksperymenty pokazały, że naniesienie kolejnej warstwy czystego enancjomeru heptahelicycy prowadzi do powstania struktury Moiré ze względu na kwasi-epitaksjalny wzrost z niewielkim niedopasowaniem sieci [15]. Natomiast w odróżnieniu od powierzchni Cu(111), na powierzchni Cu(100) obserwowano spontaniczną segregację poszczególnych enancjomerów mieszaniny racemicznej pentahelicycy a co za tym idzie obserwowano tworzenie się homochiralnych domen molekularnych [16]. Słynny eksperyment Louisa Pasteura przeprowadzony w 1848 roku został powtórzony w skali molekularnej na zaadsorbowanej mieszaninie racemicznej pentahelicycy na Cu(111) [20]. W eksperymencie tym za pomocą igły STM dokonano rozdzielenia dimerów heptahelicycy powstających na Cu(111) na odizolowane molekuly i pokazano w ten sposób na bardzo silną preferencję tworzenia się par heterochiralnych [20]. Najnowsze badania heptahelicycy na Cu(111) przy użyciu spinowo- oraz kątowno- rozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej pokazały, że nie obserwuje się indukowanej chiralnością asymetrii fotoemisyjnej [21]. W celach porównawczych wykonano także badania heptahelicycy na innych podłożach metalicznych. Na przykład pokazano, że w przypadku badań mieszaniny racemicznej pentahelicycy na powierzchni Au(111) oraz Ag(111) także obserwuje się tworzenie podwójnych rzędów molekularnych typu zig-zag, w skład których wchodzi na przemian występujące enancjomery [19]. Pokazano, że podwójne rzędy molekularne pentahelicycy na Au(111) oraz Ag(111) były zorientowane równoległe do kierunku krystalograficznego wysokiej symetrii podłoża $\langle 1-10 \rangle$, natomiast na powierzchni Cu(111) podwójne rzędy molekularne były odchylone od tego kierunku.

W przeciwieństwie do szeroko opisywanych badań STM na molekułach karbo[n]heliceny zaadsorbowanych na metalicznych podłożach, w literaturze badania molekuł tia[n]heteroheliceny są mocno ograniczone. Molekuły tia[n]heteroheliceny są zbudowane z występujących na przemian pierścieni tiofenowych i benzenowych. Przykładowo Taniguchi *et al.* badał adsorpcję tia[11]heteroheliceny ([11]TH) na powierzchni Au(111) oraz Au(110) pokazując tworzenie się uporządkowanej warstwy, która umożliwiła mu identyfikację poszczególnych enancjomerów [22,23]. Baciú *et al.* badał adsorpcję molekuł ditia[7]heliceny na powierzchni Au(111) otrzymując molekularną zdolność rozdzielczą w temperaturze pokojowej w powietrzu co przypisał silnemu oddziaływaniu pomiędzy atomem siarki w szkielecie molekuły a powierzchnią Au(111) [24]. Cao *et al.* badał adsorpcję molekuł tetratia[7]heliceny na krzemie, na powierzchni wysoce zorientowanego grafitu pirolitycznego (HOPG) oraz Au(111) na granicy ciecz/ciało stałe pokazując tworzenie się warstw samoorganizujących.

W cyklu przedstawiam wyniki moich badań molekuł tia[n]heteroheliceny na podłożach metalicznych takich jak Au(111), Ag(111), Cu(001) oraz NiAl(110). Przedstawiam badania molekuł tia[5]heteroheliceny ([5]TH) oraz tia[7]heteroheliceny ([7]TH) w kontekście analogicznych badań karbo[5]heliceny oraz karbo[7]heliceny. Ponadto przedstawiam wyniki badań molekuł heteroheliceny funkcjonalizowanych dwoma grupami aldehydowymi ([7]TH-dial) lub też dwoma grupami hydroksylowymi ([7]TH-diol). W badaniach używałem komercyjny mikroskop USM1400-TERS (Unisoku) umożliwiający unikalne na skalę światową badania emisji światła indukowanego w złączu tunelowym STM-LE (ang. *STM-induced Light Emission*) a także na badania spektroskopii Ramana wzmocnionej ostrzem TERS (ang. *Tip-enhanced Raman Spectroscopy*). Na szczególne wyróżnienie zasługują więc moje oryginalne badania emisji światła STM-LE na molekułach tia[n]heteroheliceny oraz spektroskopii Ramana wzmocnionej ostrzem TERS-STM. Należy tutaj zaznaczyć, że badania STM-LE oraz TERS-STM nigdy wcześniej nie były prezentowane w literaturze naukowej na jakichkolwiek molekułach heliceny. Aby pokazać, że możliwa jest także wizualizacja procesu samoorganizacji innego typu molekuł chiralnych przedstawiam wyniki badań czystego optycznie enancjomeru (S)-PTCDI na Au(111). Wszystkie chiralne molekuły przedstawione w cyklu naparowywałem termicznie na czystą powierzchnie metaliczną w UHV a następnie charakteryzowałem za pomocą mikroskopu STM w temperaturze ciekłego azotu (80 K). Na Rys. 1 przedstawiam chiralne molekuły, które są przedmiotem badań w moim cyklu powiązanych tematycznie publikacji. Wszystkie prace cyklu powstały po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych. Prace wchodzące do cyklu powstały podczas mojego pobytu na Uniwersytecie Osakijskim

w grupie prof. Yuji Kuwahary a także w wyniku mojej dalszej ścisłej współpracy z nim po powrocie do Polski. W czterech pracach cyklu jestem pierwszym i korespondencyjnym autorem.



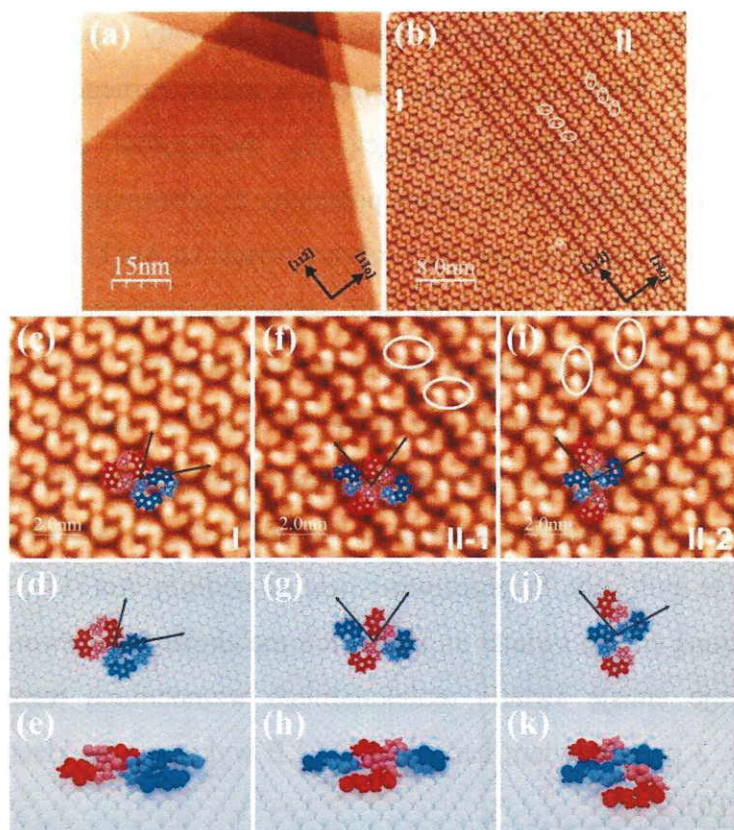
Rys. 1. Chiralne molekuly w badaniach składających się na cykl powiązanych tematycznie publikacji stanowiący znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych

[H1] P. Krukowski*, T. Hattori, M. Okada, M. Piskorski, I. Lutsyk, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Study of Stereochemical Crystallization of Racemic Mixtures of [5] and [7]thiaheterohelicene Molecules on Ag(111) Surface by Scanning Tunneling Microscopy and Raman Scattering Spectroscopy*, Applied Surface Science 589 (2022) 152860

Pierwsza praca wchodząca do cyklu dotyczy badań mieszaniny racemicznej molekuł helicycy [5]TH oraz [7]TH zaadsorbowanej na powierzchni Ag(111). Moje badania wykonane za pomocą mikroskopu STM pokazują, że molekuly [5]TH oraz [7]TH tworzą na powierzchni Ag(111) wysoce uporządkowane samoorganizujące się warstwy. Badania pokazują, że możliwa jest wizualizacja z bardzo dużą rozdzielczością samoorganizacji powyższych molekuł za pomocą mikroskopu STM. Zaobserwowałem, że krystalizacja i samoorganizacja na powierzchni Ag(111) bardzo silnie zależy od budowy molekuly thiaheterohelicycy, mianowicie zależy od ilości pierścieni aromatycznych wbudowanych w spiralne szkielety poszczególnych molekuł. W efekcie sformułowalem wniosek, że stereospecyficzne oddziaływania dla poszczególnych molekuł silnie wpływają na tworzenie się samoorganizujących się warstw. Ponadto zaobserwowałem, że molekuly [5]TH krystalizują na Ag(111) tworząc różnorodne racemiczne domeny molekularne. Moje badania STM o wysokiej

rozdzielczości pokazały, że można jednoznacznie identyfikować konfigurację absolutną poszczególnych enancjomerów molekuł helicyny [5]TH na powierzchni Ag(111). W przeciwieństwie do molekuł helicyny [5]TH, molekuły helicyny [7]TH krystalizują tworząc jeden typ domeny molekularnej tzn. charakterystyczne dwurzędy molekularne typu zig-zag. Moje badania spektroskopii fotoelektronów w zakresie promieniowania rentgenowskiego XPS (ang. *X-ray Photoelectron Spectroscopy*) wykazały, że molekula helicyny [5]TH ulega fizysorpcji na powierzchni Ag(111). W pracy pokazałem także badania spektroskopii Ramana wzmocnionej powierzchnią SERS (ang. *Surface Enhanced Raman Spectroscopy*). Pokazałem, że możliwa jest identyfikacja chemiczna molekuł helicyny na chropowatej powierzchni srebra. Ponadto pokazałem, że możliwa jest detekcja bardzo silnego sygnału Ramana pochodzącego z molekuł zaadsorbowanych na rysie płaskiej powierzchni Ag(111). Użycie rysy na powierzchni Ag(111) jako podłoża do badań SERS było moim oryginalnym pomysłem badawczym. Moje obliczenia DFT modów wibracyjnych molekuł helicyny [5]TH oraz [7]TH w fazie gazowej pokazały doskonałą zbieżność z wynikami doświadczalnymi otrzymanymi za pomocą techniki SERS co umożliwiło mi identyfikację chemiczną poszczególnych molekuł helicyny. Na Rys. 2 przedstawiam wysokiej rozdzielczości obrazy STM molekuł helicyny [5]TH na powierzchni Ag(111) oraz odpowiadające im modele adsorpcyjne.

W omawianej pracy mój wkład indywidualny był wiodący. Obejmował wszystkie aspekty dotyczące powstania pracy naukowej. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM, XPS, SERS, poprzez analizę wszystkich wyników, wykonaniu obliczeń DFT, sformułowaniu wniosków, przygotowaniu manuskryptu oraz przygotowaniu odpowiedzi dla recenzentów.

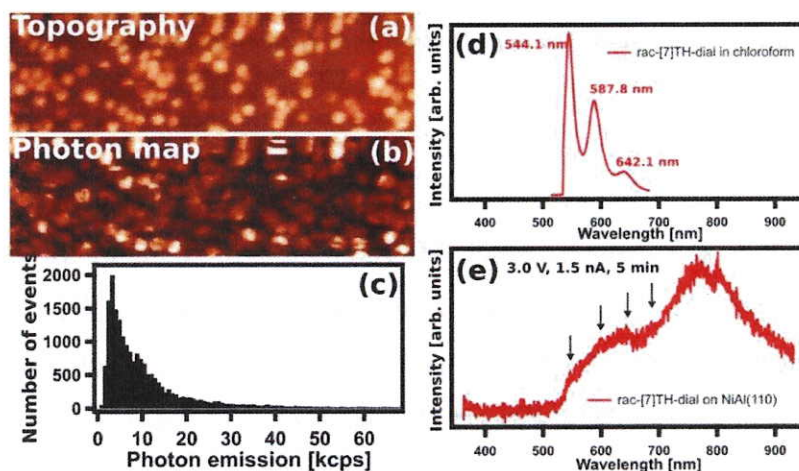


Rys. 2. Obrazy STM molekuł heliceny [5]TH na powierzchni Ag(111) oraz odpowiadające im modele adsorpcyjne [H1]

[H2] P. Krukowski*, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Adsorption and Light Emission of a Racemic Mixture of [7]thiaheterohelicene-2,13-carboxaldehyde on Au(111), Cu(001), and NiAl(110) Surfaces Investigated Using a Scanning Tunneling Microscope*, Journal of Physical Chemistry C 125 (2021) 9419

Następna praca wchodząca do cyklu dotyczy badań mieszaniny racemicznej molekuł heliceny [7]TH-dial zaadsorbowanej na powierzchni Au(111), Cu(001) i NiAl(110). W pracy tej przedstawiam systematyczne badania adsorpcji molekuł heliceny [7]TH-dial w funkcji pokrycia molekularnego za pomocą mikroskopii STM. W pracy pokazuję, że w przypadku niewielkiego pokrycia molekularnego proces adsorpcji molekuł heliceny [7]TH-dial silnie zależy od rekonstrukcji herringbone powierzchni Au(111). Przy większych pokryciach sięgających monowarstwy obserwowałem tworzenie się na powierzchni Au(111) charakterystycznych dwurzędów molekularnych typu zig-zag, które były skierowane w kierunku $\langle 11-2 \rangle$. Zaobserwowałem, że molekuly heliceny [7]TH-dial w dwurzędach

molekularnych są preferencyjnie ułożone w sposób zygzakowaty z naprzemiennie występującymi enancjomerami (M) i (P). Wraz ze wzrostem pokrycia molekularnego zaobserwowałem przejście struktury molekularnej od samoorganizujących się dwurzędów do samoorganizujących się pojedynczych rzędów molekularnych. W pracy pokazuję, że adsorpcja molekuł helicy [7]TH-dial na Cu(001) i NiAl(110) jest zupełnie inna niż ta obserwowana na Au(111). Na powierzchni Cu(001) i NiAl(110) nie obserwowałem tworzenia się samoorganizujących się dwurzędów, ani domen molekularnych. Natomiast obserwowałem powstawanie klastrów molekularnych. Moje badanie emisji światła indukowanej za pomocą igły STM-LE molekuł helicy [7]TH-dial na Au(111) pokazały tłumienie emisji światła plazmonowego przez zaadsorbowane molekuly. Badanie STM-LE molekuł helicy [7]TH-dial zaadsorbowanych na Cu(001) także wykazało tłumienie emisji światła plazmonowego przez te molekuly. W przeciwieństwie do podłoża Au(111), Cu(001), badania STM-LE wykazały zwiększoną emisję światła na klastrach molekularnych utworzonych na metalicznym NiAl(110), co sugeruje emisję światła molekularnego wzmocnioną rezonansem plazmonowym powierzchni. Na Rys. 3 przedstawiam badania STM-LE wykonane na klastrach molekuł helicy [7]TH-dial na NiAl(110).

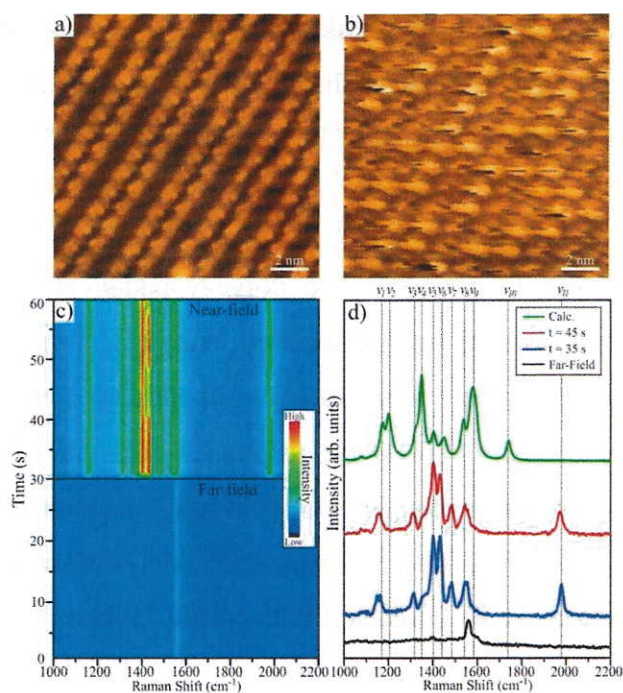


Rys. 3. (a) Obraz topografii STM klastrów molekuł helicy [7]TH-dial na NiAl(110) i odpowiadająca topografii (b) mapa fotonowa pokazująca wzrost intensywności światła nad klastrami molekularnymi. (c) Histogram rozkładu intensywności emisji światła dla mapy fotonowej. (d) Badania konwencjonalnej luminescencji indukowanej laserem roztworu molekuł helicy [7]TH-dial w chloroformie. (e) Widmo STM-LE zebrane na klastrze helicy [7]TH-dial na NiAl(110) H[2]

W omawianej pracy mój wkład indywidualny był wiodący. Obejmował wszystkie aspekty dotyczące powstania pracy naukowej. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM oraz STM-LE, wykonaniu analizy wszystkich wyników, sformułowaniu wniosków, przygotowaniu manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów.

[H3] S. Chaunchaiyakul*, A. Setiadi, **P. Krukowski**, F.C.I. Catalan, M. Akai-Kasaya, A. Saito, N. Hayazawa, Y. Kim, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Nanoscale Dehydrogenation Observed by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy*, *Journal of Physical Chemistry C* 121 (2017) 8162

Następna praca wchodząca do mojego cyklu dotyczy badań mieszaniny racemicznej molekuł helicy [7]TH-dial zaadsorbowanej na powierzchni Au(111) za pomocą innowacyjnej techniki TERS-STM. Celem badań była identyfikacja chemiczna na poziomie molekularnym zaadsorbowanych molekuł helicy [7]TH-dial na powierzchni Au(111). Praca jest rozszerzeniem poprzedniej pracy [H2] w której prezentuję samoorganizację oraz emisję światła indukowaną ostrzem STM molekuł helicy [7]TH-dial na Au(111). Praca [H3] wnosi nowe interesujące wyniki dotyczące możliwości badań molekularnych za pomocą TERS-STM. Badania TERS-STM wykonywałem na dobrze uporządkowanej warstwie molekularnej helicy [7]TH-dial na Au(111). W pracy pokazuję, że molekuly mieszaniny racemicznej helicy [7]TH-dial na Au(111) tworzą dwurzędy molekularne typu zig-zag. Podczas badań TERS-STM samoorganizacja molekuł była tylko w niewielkim stopniu zaburzona w wyniku oświetlenia laserem. Badania TERS-STM umożliwiły mi identyfikację chemiczną molekuł helicy [7]TH-dial na Au(111) na poziomie molekularnym. Obserwowane eksperymentalnie mody wibracyjne molekuł helicy [7]TH-dial były w zgodzie z oczekiwanymi drganiami obliczonymi w oparciu o teorię funkcjonału gęstości DFT z jednym wyjątkiem. Mianowicie, w badaniach TERS-STM obserwowałem mod wibracyjny w okolicach $\sim 2000 \text{ cm}^{-1}$, który był nieobecny w obliczeniach DFT. W wyniku dalszych obliczeń DFT w pracy pokazałem, że mod wibracyjny $\sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ można przypisać tworzeniu się potrójnego wiązania $\text{C}\equiv\text{C}$. W pracy sugeruję proces odwodornienia pierścienia benzenowego molekuł helicy [7]TH-dial podczas pomiarów TERS-STM. Ponadto sugeruję odwodornienie w wyniku pirolizy skrajnego pierścienia helicy [7]TH-dial tzn. pierścienia wystającego najbardziej w górze. W takiej konfiguracji końcówka igły STM ze srebra oświetlana zielonym laserem służyły zarówno jako lokalne źródło ciepła jak i katalizator. Na Rys. 4 przedstawiam wyniki TERS-STM otrzymane na warstwie molekuł helicy [7]TH-dial na Au(111).



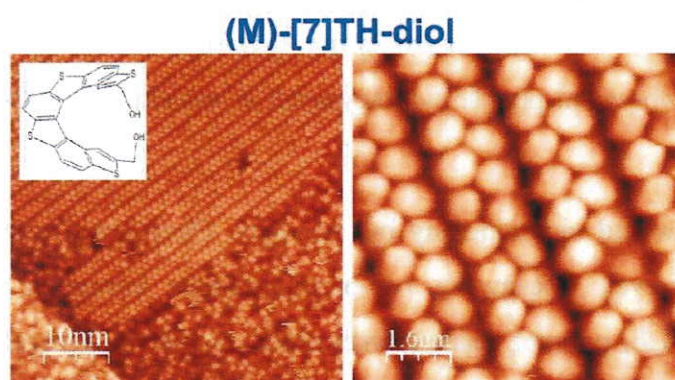
Rys. 4. Obrazy STM molekuł heliceny [7]TH-diol na powierzchni Au(111) otrzymane (a) bez oświetlenia oraz (b) z oświetleniem złącza tunelowego za pomocą lasera. (c) Widma Ramana otrzymane dla igły zbliżonej do powierzchni (Near-field) oraz igły oddalonej od powierzchni (Far-field). Dla igły zbliżonej widoczne są widma spektroskopii Ramana wzmocnionej igłą TERS-STM. (d) Widma TERS-STM porównane z obliczeniami DFT [H3]

W omawianej pracy mój wkład indywidualny był bardzo duży. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM oraz TERS-STM. Zajmowałem się też analizą statystyczną otrzymanych wyników doświadczalnych. Brałem czynny udział w dyskusji nad ostateczną wersją manuskryptu oraz w dyskusji podczas przygotowywania odpowiedzi dla recenzentów.

[H4] S. Chaunchaiyakul, **P. Krukowski**, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara*, *Self-Assembly Formation of M-Type Enantiomer of 2,13-Bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules on Au(111) Surface Investigated by STM/CITS*, Journal of Physical Chemistry C 119 (2015) 21434

Oprócz badań mieszanin racemicznych molekuł tia[n]heteroheliceny na podłożach metalicznych zaprezentowanych w pracach [H1]-[H3], badałem także enancjomerycznie czyste związki. Kolejna moja praca [H4] jest przykładem takich badań. W pracy tej badam optycznie czysty lewoskrętny enancjomer heliceny (M)-[7]TH-diol zaadsorbowany na powierzchni Au(111). W pracy [H4] pokazuję, że molekuly heliceny (M)-[7]TH-diol przy małych pokryciach adsorbują głównie na

krawędziach tarasów, na obszarach fcc oraz kolanek rekonstrukcji herringbone powierzchni Au(111). Przy niewielkich pokryciach obserwowałem także tworzenie się klasterów składających się z dwóch lub trzech molekuł. W wyniku optymalizacji preparowania próbek otrzymałem dla większych pokryć molekularnych wysoce uporządkowane wyspy składające się z samoorganizujących się molekuł (M)-[7]TH-diol, które były otoczone nieuporządkowanymi obszarami. Wyspy wykazywały uporządkowane dwurzędowe molekularne typu zig-zag. Preferowany kierunek dwurzędów molekularnych wykazywał nachylenie o kąt $\pm 12^\circ$ w stosunku do kierunku $\langle 11-2 \rangle$. Moja szczegółowa analiza statystyczna samoorganizujących się dwurzędów ujawniła, że komórka elementarna dwurzędów ma wektory sieci a i b odpowiednio 2,4 i 4,4 nm, z kątem 77° między nimi. Moje obrazy wysokiej rozdzielczości wykazały dwie różne orientacje molekuł (M)-[7]TH-diol w samoorganizującej się warstwie. Zaproponowany przeze mnie model tworzenia się samoorganizujących się dwurzędów obejmuje brak tworzenia się silnego wiązania wodorowego pomiędzy grupami hydroksylowymi sąsiednich molekuł helicy (M)-[7]TH-diol na Au(111). Przeprowadziłem także badania lokalnej struktury elektronowej za pomocą prądowo obrazującej spektroskopii tunelowej CITS (ang. *Current Imaging Tunneling Spectroscopy*) na samoorganizujących się dwurzędach molekularnych. Moje badania CITS wyznaczyły poziomy HOMO i LUMO molekuly (M)-[7]TH-diol względem poziomu Fermiego podłoża a co za tym idzie określiłem przerwę energetyczną molekuly zaadsorbowanej na Au(111). Na Rys. 5 przedstawiam samoorganizację molekuł helicy (M)-[7]TH-diol na powierzchni Au(111). Charakterystyczne dwurzędowe molekularne typu zig-zag zbudowane z molekuł (M)-[7]TH-diol na powierzchni Au(111) obserwowałem z bardzo dobrą zdolnością rozdzielczą za pomocą mikroskopu STM.



Rys. 5. Obraz STM pokazujący samoorganizację molekuł helicy (M)-[7]TH-diol na powierzchni Au(111) [H5]

W omawianej pracy mój wkład indywidualny był wiodący. Obejmował wszystkie aspekty dotyczące powstania pracy naukowej. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM oraz CITS, wykonaniu analizy wszystkich wyników, sformułowaniu wniosków, przygotowaniu manuskryptu oraz odpowiedzi dla recenzentów. Praca była efektem mojej

współpracy laboratoryjnej z p. Songpol Chaunchaiyakul, który był wówczas doktorantem. Podczas przeprowadzenia badań uczył się on ode mnie jak wykonywać pomiary STM oraz CITS a następnie je analizować.

[H5] P. Krukowski*, T. Hattori, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Light Emission from M-Type Enantiomer of 2,13-bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules Adsorbed on Au(111) and C₆₀/Au(111) Surfaces Investigated by STM-LE*, International Journal of Molecular Sciences 23 (2022) 15399

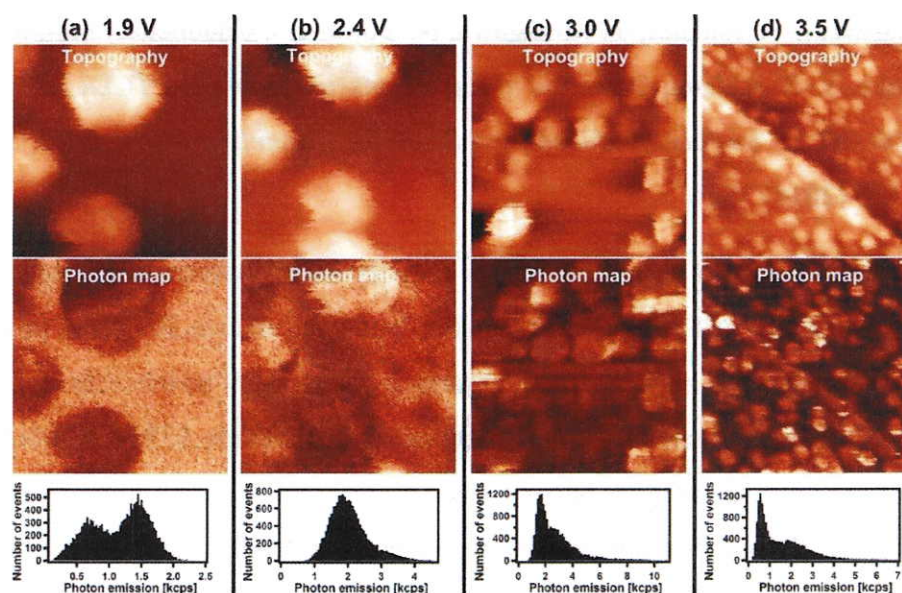
Następna praca wchodząca do cyklu dotyczy badań emisji światła z warstwy molekuł (M)-[7]TH-diol zaadsorbowanej na warstwie buforowej na powierzchni Au(111) za pomocą metody STM-LE. W badaniach użyłem warstwę zbudowaną z fulerenów C₆₀ jako warstwę buforową mającą na celu zmniejszenie oddziaływania między molekułą (M)-[7]TH-diol a metaliczną powierzchnią Au(111). Zastosowanie warstwy buforowej jest bardzo istotne w kontekście możliwości niepromienistego powrotu molekuł ze stanów wzbudzonych do stanu podstawowego spowodowanego silnym oddziaływaniem między molekułą a metaliczną powierzchnią. Zastosowanie warstwy buforowej jest też ważne w kontekście redukcji silnej emisji światła plazmonowego z powierzchni Au(111). Mapa fotonowa emisji światła wykonana na warstwie molekuł (M)-[7]TH-diol osadzonej na C₆₀/Au(111) ujawniła silną emisję światła. Aby lepiej zrozumieć proces emisji światła z warstwy molekuł (M)-[7]TH-diol zebrałem także widma STM-LE. W wyniku mojej analizy w pracy sugeruję, że emisja światła z warstwy (M)-[7]TH-diol osadzonej na C₆₀/Au(111) ma pochodzenie plazmonowe z jednoczesnym silnym wpływem przejść wibracyjnych w molekułach (M)-[7]TH-diol na ostateczne widmo emisyjne.

W pracy [H5] mój wkład indywidualny był wiodący. Obejmował wszystkie aspekty dotyczące powstania pracy naukowej. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM, STM-LE, poprzez analizę wszystkich wyników, polegał także na sformułowaniu wniosków, przygotowaniu manuskryptu oraz przygotowaniu odpowiedzi dla recenzentów.

[H6] P. Krukowski, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, N. Yajima, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, Y. Miyake, Y. Kuwahara, *Detection of Light Emission from (S)-PTCDI Molecules Adsorbed on Au(111) and NiAl(110) Surfaces Induced by a Scanning Tunneling Microscope*, Journal of Physical Chemistry C 120 (2016) 3964

Ostatnia praca wchodząca do mojego cyklu dotyczy badań optycznie czystego enancjomeru (S)-PTCDI na powierzchni Au(111). W pracy pokazałem silną emisję światła z powierzchni Au(111) wynikającą z promienistego zaniku zlokalizowanych plazmonów powierzchniowych indukowanych przez nieelastyczne tunelowanie elektronów podczas badań metodą STM-LE. Mapy fotonowe emisji światła ujawniły nawet rekonstrukcję herringbone powierzchni Au(111). Moje badania STM pokazały, że molekuly (S)-PTCDI samoorganizują się na powierzchni Au(111) tworząc wysoce uporządkowane domeny molekularne. Obserwowałem cztery różne domeny molekularne. Przeprowadzone przeze mnie badania emisji światła z molekuł (S)-PTCDI na Au(111) pokazały, że zaadsorbowane molekuly (S)-PTCDI tłumią emisję światła plazmonowego z powierzchni Au(111). Nie obserwowałem emisji światła molekularnego z molekuł (S)-PTCDI zaadsorbowanych na Au(111). Jako drugie podłoże do badań użyłem powierzchnię NiAl(110). Moje badania emisji światła STM-LE z powierzchni NiAl(110) pokazały emisję światła z powierzchni wynikającą z promienistego zaniku zlokalizowanych plazmonów powierzchniowych indukowanych przez nieelastyczne tunelowanie elektronów. W przeciwieństwie do powierzchni Au(111), nie obserwowałem samoorganizacji molekuł (S)-PTCDI na powierzchni NiAl(110). Obserwowałem na powierzchni NiAl(110) tworzenie się klasterów molekularnych. Ponadto obserwowałem silne wzmocnienie światła na klasterach (S)-PTCDI na powierzchni NiAl(110) przy napięciach polaryzacji większych niż 2,4 V. W pracy sugeruję, że wzmocniona emisja światła na klasterach molekuł (S)-PTCDI jest pochodzenia molekularnego. Na Rys. 6 przedstawiam badania STM-LE wykonane na klasterach molekuł (S)-PTCDI na powierzchni NiAl(110) pokazujące wzmocnienie emisji światła na klasterach molekularnych.

W omawianej pracy mój wkład indywidualny był wiodący. Obejmował wszystkie aspekty dotyczące powstania pracy naukowej. Począwszy od przygotowania koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów STM, STM-LE, poprzez analizę wszystkich wyników, sformułowaniu wniosków, przygotowaniu manuskryptu oraz przygotowaniu odpowiedzi dla recenzentów.



Rys. 6. Obrazy topograficzne STM klasterów molekuł (S)-PTCDI na powierzchni NiAl(110) oraz odpowiadające obrazom topograficznym mapy fotonowe zebrane dla różnych napięć polaryzacji pokazujące wzrost emisji światła na klasterach molekularnych dla napięć polaryzacji wyższych niż 2,4 V [H6]

4.1 Modyfikacja pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych

Dodatkowym osiągnięciem naukowym stanowiącym wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych (innym niż omawiany wyżej cykl publikacji) są też moje badania dotyczące modyfikacji pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych na potrzeby diod OLED. Tematyka powyższego osiągnięcia to:

Modyfikacja pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych na potrzeby zastosowania grafenu jako transparentnej elektrody przewodzącej w organicznej diodzie elektroluminescencyjnej (OLED)

Powyższe badania były realizacją zakończonego już projektu NCN Opus 2016/21/B/ST5/00984 pt. *Hybrydowy układ grafen-tlenek metalu przejściowego: synteza i zastosowanie jako anody oraz katody w organicznych diodach emitujących światło*. Należy w tym miejscu także zauważyć, że pełniłem funkcję kierownika powyższego grantu badawczego po śmierci poprzedniego kierownika prof. dr hab. Zbigniewa Kluska.

Wprowadzenie do badań

Powszechnie wiadomo, że grafen będąc materiałem dwuwymiarowym ma unikalne właściwości elektryczne, optyczne, termiczne oraz mechaniczne [25]. Dlatego też ze względu na jego wysoką przewodność elektryczną, przezroczystość w zakresie widzialnym i elastyczność, grafen może być rozważany jako elektroda w konstrukcji diody OLED [26]. Uważa się, że elektroda zbudowana w oparciu o grafen może w najbliższej przyszłości zastąpić standardowo używany tlenek indowocynowy (ITO) w konstrukcji OLED. Bardzo ciekawe wydaje się też zastosowanie grafenu jako elastycznej elektrody w konstrukcjach elektroniki elastycznej. Jednakże istnieje poważny problem dotyczący możliwości zastosowania grafenu jako anody w diodach OLED. Mianowicie, niedomieszkowany grafen ma zbyt niską pracę wyjścia, aby zastosować go jako anodę. Praca wyjścia elektrody musi być dostosowana do wartości poziomów energetycznych następnej warstwy. Grafen, w zależności od liczby warstw oraz obecności defektów ma pracę wyjścia w zakresie 4,0 – 4,8 eV. Aby skutecznie działać jako anoda w diodzie OLED, praca wyjścia anody grafenowej powinna być wyższa i wynosić około 5,2 eV. W moich badaniach podjąłem się próby zmiany pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych takich jak Re_2O_7 oraz MoO_3 . Moje powyższe osiągnięcie naukowe składa się z następujących prac ponumerowanych zgodnie z numeracją z listy w Wykazie osiągnięć naukowych:

- [A11] **P. Krukowski**, M. Piskorski, R. Udovyt'ska, D.A. Kowalczyk, I. Lutsyk, M. Rogala, P. Dąbrowski, W. Kozłowski, B. Łuszczyn'ska, J. Jung, J. Ulański, K. Matuszek, A. Nadolska, P. Przybysz, W. Ryś, K. Toczek, R. Dunal, P. Krempiński, J. Czerwińska, M. Le Ster, M. Skulimowski, P.J. Kowalczyk, *Graphene on quartz modified with rhenium oxide as a semitransparent electrode for organic electronics*, Opto-Electronics Review, 30 (2022) e141953, cytowania - 1
- [A12] D.A. Kowalczyk, M. Rogala, K. Szałowski, D. Belić, P. Dąbrowski, **P. Krukowski**, I. Lutsyk, M. Piskorski, A. Nadolska, P. Krempiński, M. Le Ster, P.J. Kowalczyk, *Two-Dimensional Crystals as a Buffer Layer for High Work Function Applications: The Case of Monolayer MoO_3* , ACS Applied Materials & Interfaces 14 (2022) 44506, cytowania - 7
- [A14] P.J. Kowalczyk, **P. Krukowski**, D.A. Kowalczyk, K. Pabianek, I. Lutsyk, M. Rogala, P. Dąbrowski, A. Busiakiewicz, M. Piskorski, W. Kozłowski, B. Łuszczyn'ska, R. Udovyt'ska, J. Jung, J. Ulański, J. Baranowski, S.A. Brown, G. Bian, Przegląd Elektrotechniczny, *Elastyczne ogniwa fotowoltaiczne na bazie materiałów dwuwymiarowych i ich hybryd*, 2 (2022) 117, cytowania - 1

[A17] D.A. Kowalczyk, M. Rogala, K. Szałowski, W. Kozłowski, I. Lutsyk, M. Piskorski, **P. Krukowski**, P. Dąbrowski, D. Belić, M. Cichomski, Z. Klusek, P.J. Kowalczyk, *Local electronic structure of stable monolayers of α -MoO_{3-x} grown on graphite substrate*, 2D Materials, 8 (2021) 25005, cytowania - 11

[A19] **P. Krukowski**, D.A. Kowalczyk, M. Piskorski, P. Dąbrowski, M. Rogala, P. Caban, P. Ciepielewski, J. Jung, J.M. Baranowski, J. Ulanski, Z. Klusek, *Work Function Tunability of Graphene with Thermally Evaporated Rhenium Heptoxide for Transparent Electrode Applications*, Advanced Engineering Materials 22 (2020) 1900955, cytowania - 7

W pracy [A11] pokazujemy, że dostępny na rynku grafen na kwarcu, przeniesiony z folii miedzianej, dodatkowo zmodyfikowany tlenkiem renu spełnia podstawowe wymagania dotyczące zastosowania grafenu jako przewodzącej i transparentnej anody w urządzeniach optoelektronicznych. Badania XPS wykazały, że tlenek renu na grafenie zawiera głównie fazę Re₂O₇. Badania UPS pokazują, że pracę wyjścia grafenu można łatwo modyfikować poprzez naporowanie Re₂O₇. Obserwowaliśmy wzrost pracy wyjścia grafenu aż do poziomu 5,2 eV, czyli poziomu akceptowalnego do zastosowań w rzeczywistych urządzeniach. Badania spektroskopii Ramana pokazały tylko na lokalne występowanie defektów grafenu po naniesieniu Re₂O₇.

Mój wkład w pracy [A11] był wiodący i obejmował wykonanie badań AFM, XPS, UPS analizę wyników oraz polegał na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na uwagi recenzentów. Praca ta ma duże znaczenie ponieważ pokazuje, że relatywnie tani grafen na kwarcu dostępny komercyjnie może być potencjalnie zastosowany w rzeczywistych urządzeniach optoelektronicznych. W pracy tej jestem pierwszym oraz korespondencyjnym autorem.

W pracy [A12] pokazujemy, że krystaliczność warstwy tlenku metalu przejściowego jest kluczowa do znacznej modyfikacji pracy wyjścia na HOPG, czyli powierzchni analogicznej do grafenu. Praca pokazuje, że krystaliczna monowarstwa MoO₃ zwiększa pracę wyjścia HOPG do wartości 6,4 eV dla grubości tak małych jak 0,7 nm. Jest to kluczowe spostrzeżenie w kontekście zastosowania krystalicznej warstwy MoO₃, która może zmodyfikować pracę wyjścia grafenu. W takim przypadku, krystaliczna monowarstwa MoO₃ na powierzchni grafenu musi zachować przezroczystość oraz elastyczność anody.

Mój wkład w powstanie pracy [A12] dotyczył głównie analizy oraz dyskusji wyników doświadczalnych oraz krytycznej recenzji manuskryptu.

W pracy [A14] pokazujemy możliwość zwiększenia pracy wyjścia grafenu dzięki dodatkowej warstwie tlenku molibdenu lub renu. Postulujemy, że pojedyncza warstwa krystaliczna MoO_3 może podnieść pracę wyjścia grafenu dzięki czemu istnieje realna szansa na jego zastosowanie w elektronice. W pracy prezentujemy wyniki, pokazujące możliwość wytworzenia monowarstwy tlenku molibdenu na grafenie.

Mój wkład w powstanie pracy [A14] dotyczył głównie dyskusji wyników doświadczalnych oraz krytycznej recenzji manuskryptu.

W pracy [A17] pokazujemy, że możliwe jest wytworzenie dwuwymiarowej warstwy MoO_{3-x} o grubości monowarstwy na powierzchni HOPG. Pokazujemy, że naniesienie dwuwymiarowej warstwy MoO_{3-x} zwiększa pracę wyjścia HOPG do wartości 5,7 eV. Ponadto w pracy pokazujemy wpływ ekspozycji na powietrze monowarstwy MoO_{3-x} . Ekspozycja taka wywołuje redukcję pracy wyjścia z 5,7 do 4,7 eV. Jest to krytyczne spostrzeżenie w kontekście budowy diod OLED w oparciu o grafenową anodę zmodyfikowaną tlenkiem molibdenu. Spostrzeżenie to wskazuje na konieczność przeprowadzania procesu wytworzenia diod w próżni lub w atmosferze gazu obojętnego.

Mój wkład w powstanie pracy [A17] dotyczył głównie dyskusji wyników doświadczalnych oraz krytycznej recenzji manuskryptu.

W pracy [A19] pokazujemy, że możliwe jest zwiększenie pracy wyjścia grafenu wychodowanego na powierzchni 6H-SiC(0001) za pomocą tlenku renu. Badania XPS pokazują, że warstwy tlenku renu na grafenie składają się głównie z fazy Re_2O_7 . Badania UPS pokazały, że praca wyjścia grafenu może być zwiększona do wartości 4,95 eV, co pokazuje że taka heterostruktura ma duży potencjał do wykorzystania jako transparentna anoda w diodach OLED.

W pracy [A19] mój wkład był wiodący, obejmował wykonanie badań XPS, UPS, AFM, analizę wyników oraz polegał na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na uwagi recenzentów. W pracy tej jestem pierwszym oraz korespondencyjnym autorem.

Moje badania dotyczące modyfikacji pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych spowodowały, że udało mi się zwiększyć pracę wyjścia grafenu do wartości odpowiedniej do zastosowania grafenu jako anody w diodzie OLED. W efekcie zbudowałem jako pierwszy w Polsce diodę OLED w oparciu o anodę grafenową, która zastąpiła konwencjonalnie stosowaną anodę z ITO.

4.2 Wytwarzanie oraz charakteryzacja samoorganizujących się wysp z CrN na powierzchni Cu(001)

Dodatkowym osiągnięciem naukowym stanowiącym wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych są też moje badania dotyczące wytwarzania i charakteryzacji samoorganizujących się wysp z CrN na powierzchni Cu(001). Tematyka powyższego osiągnięcia to:

Wytwarzanie oraz charakteryzacja samoorganizujących się wysp z CrN na powierzchni Cu(001)

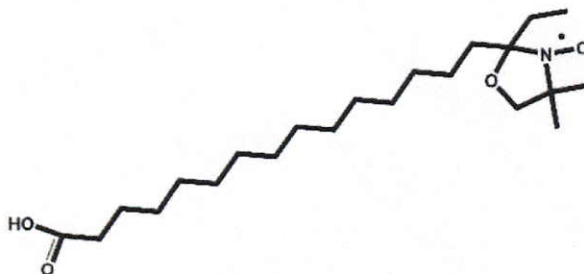
Badania dotyczące tego osiągnięcia zostały przeprowadzone w całości na Uniwersytecie Tokijskim podczas mojego stażu podoktorskiego w ramach stypendium JSPS w grupie prof. Fumio Komori. Powyższe osiągnięcie naukowe opisuję w punkcie 5.2, który to punkt dotyczy informacji o istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni.

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

5.1 Staż naukowy w Institute for Molecules and Materials, Radboud University of Nijmegen, The Netherlands

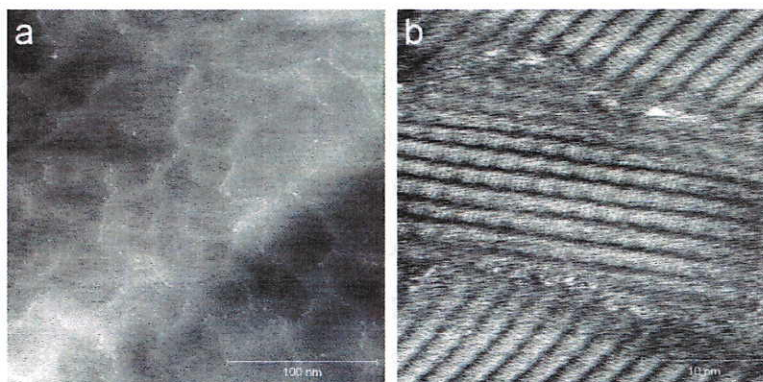
Na drugim roku studiów doktoranckich otrzymałem stypendium w ramach programu ERAZMUS na odbycie studiów zagranicznych w Institute for Molecules and Materials, Radboud University of Nijmegen, The Netherlands, w grupie kierowanej przez prof. Sylvie Speller. Termin mojego stażu to: 10.09.2006 – 25.01.2007. W trakcie stażu miałem możliwość prowadzenia badań w nowo wybudowanym laboratorium *NanoLab*. Prowadziłem badania za pomocą komercyjnego mikroskopu tunelowego VT-STM (Omicron Nanotechnology) pracującego w UHV oraz niekomercyjnego mikroskopu STM, pracującego w powietrzu/cieczy w temperaturze pokojowej. Prowadziłem badania warstw molekuł organicznych zawierających stabilne wolne rodniki osadzonych na podłożu Au(111) i HOPG(0001). Początkowo badałem molekuły TEMPO (rodnik 2,2,6,6-tetrametylopiperidyno-1-oksylowy) oraz BDPA (rodnik α,γ -bisdifenylen- β -fenylalylu) naniesione na powierzchnię Au(111), metodą zanurzenia w roztworze alkoholu etylowego. Badania pokazały, że molekuły TEMPO oraz

BDPA tworzą na Au(111) duże płaskie tarasy w postaci gęstej molekularnej warstwy. Jednakże trudno mi było otrzymać rozdzielczość molekularną na powyższych molekułach. Trzecią molekułą którą badałem podczas stażu była molekuła 16DS (2-(14-karboksytetradecylo)-2-etylo-4,4-dimetylo-3oksazolidynyl-1-oksyl), którą osadzałem na HOPG. Molekuła 16DS jest to pochodna kwasu stearynowego, w którym paramagnetyczna grupa doksylowa jest przyłączona do szesnastego atomu węgla w łańcuchu węglowodorowym, licząc od grupy karboksylowej. Molekuła 16DS jest klasycznym znacznikiem spinowym wykorzystywanym szeroko w biochemii [27]. Kroplę roztworu molekuł 16DS nanosiłem na świeżo oczyszczoną powierzchnię HOPG. Podczas moich badań igła mikroskopu została zanurzona w roztworze, a otrzymane obrazy STM zostały otrzymane z wnętrza kropli cieczy. Na Rys. 7 przedstawiona jest struktura molekuły 16DS.

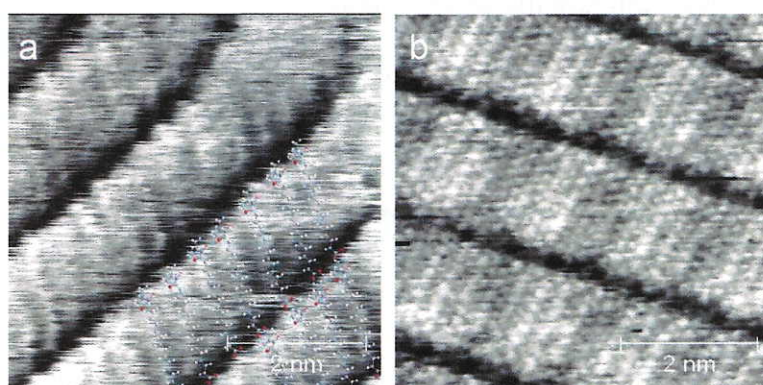


Rys. 7. Struktura molekuły 16DS

Moje badania STM pokazały, że molekuły 16DS zaadsorbowane na powierzchni HOPG tworzą uporządkowaną monowarstwę ze strukturą domenową. Domeny molekularne były oddzielone od siebie za pomocą obszarów przejściowych zwanych ścianami domenowymi (Rys. 8). Molekuły 16DS w sąsiadujących domenach były ułożone względem siebie pod kątem 120° , odzwierciedlając symetrię podłoża. Fakt ten został zinterpretowany przeze mnie jako efekt oddziaływania molekuły 16DS z podłożem. Szkielet molekuły 16DS na obrazach STM był bardzo dobrze widoczny. Wysokorozdzielcze obrazy STM ujawniły więcej strukturalnych szczegółów ujawniając pojedyncze grupy CH_2 łańcucha węglowodorowego molekuły oraz grupę doksylową. Dla porównania wykonałem także badania STM kwasu stearynowego na HOPG (Rys. 9).



Rys. 8. (a) Obraz STM struktury domenowej molekuł 16DS na powierzchni HOPG. (b) Obraz STM struktury oraz ścian domenowych molekuł 16DS [28]



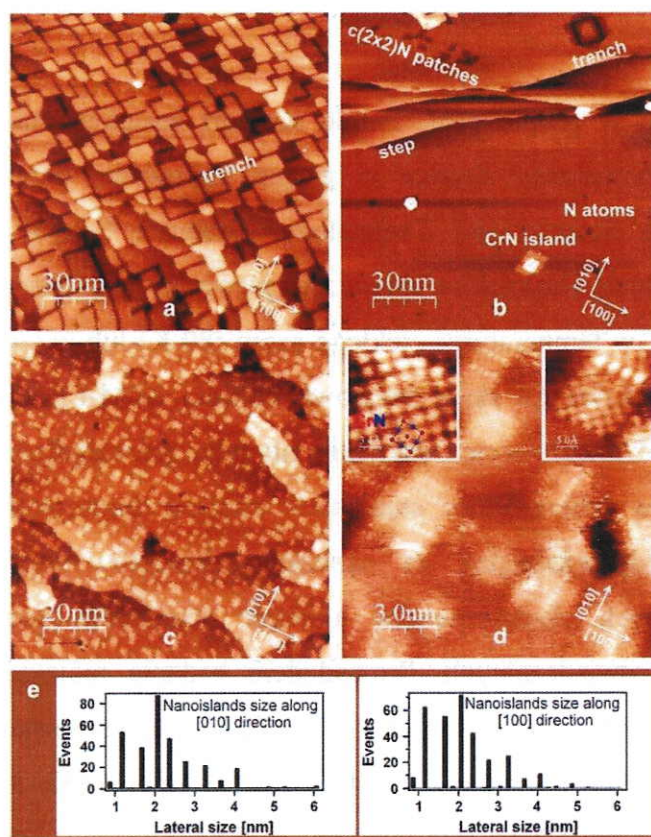
Rys. 9. Obraz STM samoorganizacji molekuł 16DS na powierzchni HOPG. Grupa doksyłowa jest obrazowana jako jaśniejsza część szkieletu molekuly. (b) Obraz STM obrazujący samoorganizację kwasu stearynowego na powierzchni HOPG [28]

Wyniki otrzymane podczas stażu w Institute for Molecules and Materials opublikowałem w pracy [28], w której jestem pierwszym oraz korespondencyjnym autorem oraz przedstawiłem w mojej pracy doktorskiej.

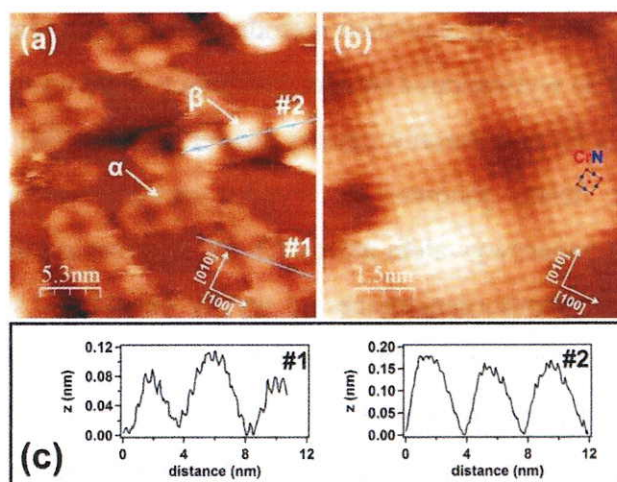
5.2 Staż podoktorski (Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Japan)

Dzięki otrzymaniu prestiżowego stypendium *JSPS Postdoctoral Fellowships for Foreign Researchers* finansowanego przez Japan Society for the Promotion of Science odbyłem 24-miesięczny staż podoktorski w Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Japan w grupie kierowanej przez prof. Fumio Komori. W trakcie stażu zajmowałem się wytwarzaniem i charakteryzacją samoorganizujących się wysp CrN na powierzchni Cu(001). Do wytwarzania wysp CrN wykorzystywałem aparaturę UHV wyposażoną w naparowywarke termiczną (EFM 3, Focus/Omicron). Natomiast do charakteryzacji wytworzonych wysp używałem mikroskop STM (Omicron), spektroskopię XPS (SES100, VG-Scienta) oraz dyfraktometr niskoenergetycznych

elektronów (LEED). Podczas badań opracowałem metodę wytwarzania samoorganizujących się wysp CrN na Cu(001) analogiczną do wytwarzania samoorganizujących się wysp MnN na Cu(001) [29,30]. Opracowana metoda polegała na poddawaniu czystej powierzchni Cu(001) działaniu aktywowanego azotu wytwarzanego przez działło jonowe. W wyniku otrzymywałem nasyconą powierzchnię Cu(001)c(2 × 2)-N, na którą naparowywałem atomy Cr. Po wygrzaniu takiej próbki w temperaturze 400 - 500 °C otrzymywałem samoorganizujące się wyspy składające się z CrN na powierzchni Cu(001). Wyniki dla powierzchni z 0,35 ML Cr pokazują istnienie dwóch typów wysp CrN z łańcuchami atomowymi i bez łańcuchów atomowych. Zmierzona stała sieci w płaszczyźnie ($a = 0,39 \pm 0,01$ nm) wysp CrN bez łańcuchów atomowych jest o 8% większa niż stała sieci podłoża Cu(001). Powstawanie wysp o ograniczonych rozmiarach przypisałem mechanizmowi zmniejszenia naprężenia w wytwarzanej warstwie. Dokonałem systematycznych badań tworzenia się wysp CrN na Cu(001) w funkcji pokrycia Cr. W wyniku stażu na Uniwersytecie Tokijskim opublikowałem dwie prace naukowe, w których jestem pierwszym oraz korespondencyjnym autorem [31,32]. Potwierdza to, że mój wkład w powstanie powyższych prac był wiodący.



Rys. 10. (a) Obraz STM powierzchni Cu(001)c(2×2)-N użytej jako podłoże do osadzania Cr. (b – d) Obrazy STM wysp CrN utworzonych na powierzchni Cu (001). Pokrycie atomów Cr wynosiło (b) 0,009 ML i (c, d) 0,35 ML [31]

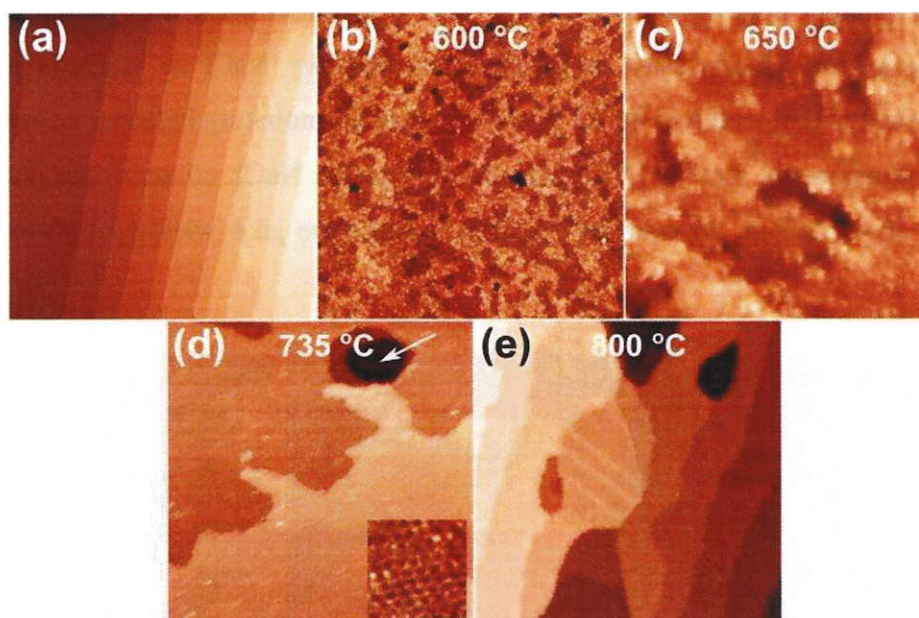


Rys. 11. (a), (b) obrazy STM wytworzonych wysp CrN na powierzchni Cu(001). Dwa rodzaje wysp CrN o różnych wysokościach są widoczne w (a). (b) Atomowa zdolność rozdzielcza otrzymana na wyspach CrN [32]

5.3 Zatrudnienie na stanowisku *Specjalnie Wyznaczony Badacz* (Department of Precision Science and Technology, Osaka University, Japan)

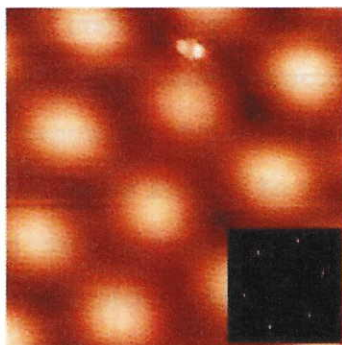
Po stażu podoktorskim w grupie prof. Fumio Komori zostałem zatrudniony na stanowisku naukowym *Specjalnie Wyznaczony Badacz* w grupie kierowanej przez prof. Yuji Kuwahare (Department of Precision Science and Technology, Graduate School of Engineering, Osaka University). Na Uniwersytecie Osakijskim byłem zaangażowany w badania za pomocą mikroskopu STM pracującego w UHV w temperaturze ciekłego azotu (80 K) lub w temperaturze ciekłego helu (5 K) umożliwiającym unikalne na skalę światową badania STM-LE oraz TERS-STM. Należy podkreślić, że pracując na Uniwersytecie Osakijskim nie tylko prowadziłem badania w nanoskali ale także opiekowałem się w laboratorium studentami studiów licencjackich, magisterskich oraz doktoranckich. Byłem odpowiedzialny za nauczanie studentów obsługi mikroskopu STM, nadzorowanie prowadzonych eksperymentów a także udzielałem pomocy przy interpretacji otrzymanych wyników doświadczalnych. Prowadziłem badania molekuł tia[n]heteroheliceny o różnych grupach funkcyjnych a także molekuł (S)-PTCDI zaadsorbowanych na powierzchniach metalicznych takich jak Au(111), Ag(111), Cu(001) oraz NiAl(110) [33–38]. Ze względu na to, że badania molekuł helicyeny oraz PTCDI stanowią mój cykl habilitacyjny i zostały już przedstawione dokładnie w autoreferacie dlatego, też skupię się na przedstawieniu innych badań jakie realizowałem na Uniwersytecie Osakijskim.

Na Uniwersytecie Osakjiskim intensywnie prowadziłem badania detekcji światła pochodzącego z molekuł zaadsorbowanych na metalicznych podłożach znajdujących się w złączu tunelowym mikroskopu STM. Ważną częścią moich badań było wytworzenie warstwy izolującej tzw. buforowej, która byłaby w stanie izolować molekuly od podłoża metalicznego. Jest to krytyczne ponieważ silne oddziaływanie molekuly z podłożem metalicznym może prowadzić do hybrydyzacji orbitali molekularnych ze stanami elektronowymi podłoża metalicznego co może skutkować niepromienistym studzeniem wzbudzonych molekuł. W trakcie stażu prowadziłem badania dotyczące wytwarzania oraz charakteryzacji warstwy buforowej Al_2O_3 na podłożu $\text{NiAl}(110)$. Wytwarzałem ultra cienkie warstwy Al_2O_3 w procesie utleniania powierzchni $\text{NiAl}(110)$ podgrzanej do temperatury $275\text{ }^\circ\text{C}$ w atmosferze tlenu o ciśnieniu $3,0 \times 10^{-4}\text{ Pa}$. Cały proces kończył się wygrzaniem podłoża w temperaturze od 600 do $800\text{ }^\circ\text{C}$ (Rys. 12).



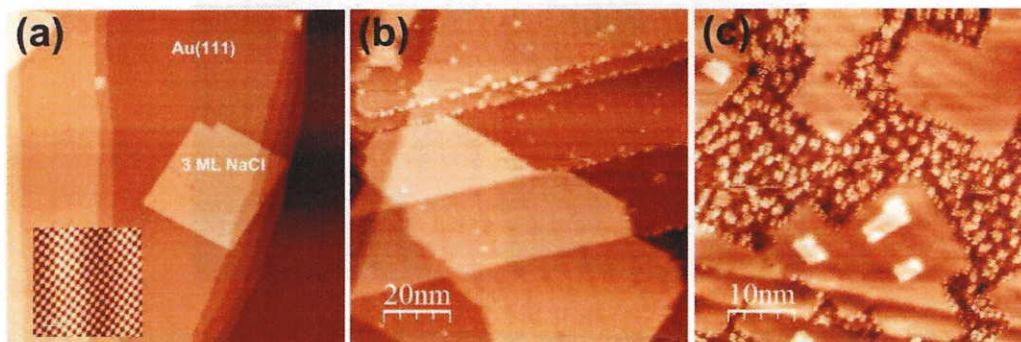
Rys. 12. Obrazy STM ultra cienkiej warstwy Al_2O_3 wytworzonej na powierzchni $\text{NiAl}(110)$, która powstała w wyniku wygrzewania podłoża w temperaturze od 600 do $800\text{ }^\circ\text{C}$ [39]

Na szczególną uwagę zasługują wyniki otrzymane w wyniku wielokrotnego wygrzewania podłoża $\text{NiAl}(110)$ w tlenie. W wyniku takiego wielokrotnego procesu otrzymałem ultra cienką warstwę Al_2O_3 charakteryzującą się heksagonalną nadstrukturą, która nigdy wcześniej nie była opisywana w literaturze naukowej co jest widoczne na Rys. 13.



Rys. 13. Obraz STM ultra cienkiej warstwy Al_2O_3 otrzymanej na powierzchni $NiAl(110)$, która charakteryzuje się heksagonalną nadstrukturą. Na obrazie widoczna jest też atomowa rozdzielcza [39]

Innym przykładem warstwy buforowej, którą próbowałem stosować podczas moich badań emisji światła z molekuł heliceny była warstwa chlorku sodu (NaCl) na powierzchni $Au(111)$. W wyniku badań otrzymywałem i obrazowałem warstwy NaCl o grubości od 2 do 6 monowarstw. Jednakże molekuly heliceny nie adsorbowały na powierzchni warstwy NaCl ze względu na silną dyfuzję molekularną nawet w temperaturze 80 K. W wyniku dyfuzji molekuly heliceny adsorbowały głównie na odsłoniętej powierzchni $Au(111)$ bądź też na krawędziach NaCl, co widoczne jest na Rys. 14. W wyniku badań stwierdziłem, że warstwy NaCl nie nadają się jako warstwy buforowe dla molekuł heliceny.



Rys. 14. Obrazy STM (a) wysp NaCl na powierzchni $Au(111)$, (b,c) wysp NaCl na powierzchni $Au(111)$ po naniesieniu molekuł heliceny

Na Uniwersytecie Osakijskim prowadziłem również badania wielościennych nanorurek węglowych za pomocą techniki TERS-STM [40]. Ze względu na duży koszt igieł do badań zajmowałem się trawieniem i optymalizacją trawienia złotych igieł [41]. Następnie złote igły wykazujące promień krzywizny mniejszy niż 50 nm używałem w badaniach TERS-STM oraz STM-LE.

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

6.1 Osiągnięcia dydaktyczne

Będąc na studiach doktoranckich prowadziłem w roku akademickim 2005/2006 ćwiczenia informatyczne dla studentów z kierunku Informatyka z następującego przedmiotu:

- *Administrowanie systemami (Windows 2000, Linux)*, dwie grupy

Po zatrudnieniu mnie w dniu 20.05.2022 r. na stanowisku adiunkta w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych prowadziłem ćwiczenia informatyczne dla studentów z kierunku Informatyka z następujących przedmiotów w roku akademickim 2022/2023:

- *Sieci komputerowe*, dwie grupy
- *Sterowanie komputerowe i robotyka*, pięć grup

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych pracowałem w roku szkolnym 2009/2010 jako nauczyciel fizyki w VIII Liceum Ogólnokształcącym im. Adama Asnyka w Łodzi. Dodatkowo w celu rozwinięcia swoich kompetencji w zakresie dydaktyki uczęszczałem na *Kurs kwalifikacyjny pedagogiczny dla czynnych zawodowo nauczycieli* w Łódzkim Centrum Doskonalenia Nauczycieli i Kształcenia Praktycznego.

Byłem **promotorem** dwóch prac magisterskich na kierunku Informatyka

- Marcel Tomczak, *Analiza zastosowania inteligentnej sieci energetycznej w Polsce z wykorzystaniem modelu stworzonego w technologii .Net.*, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki, 2022 r.
- Paulina Tomaszewska, *Automatyczne obrazowanie wielkopowierzchniowe przy użyciu mikroskopu optycznego zintegrowanego ze spektrometrem Ramana*, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki, 2021 r.

Byłem **promotorem** jednej pracy licencjackiej na kierunku Fizyka

- Patryk Krempiński, *Wzrost oraz charakteryzacja dwuwymiarowej krystalicznej warstwy tlenku metalu przejściowego na powierzchni miki*, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki, 2023 r.

Obecnie jestem **promotorem** jednej pracy magisterskiej na kierunku Informatyka

- Marcin Skawiński, *Opracowanie modułu do analizy widm Ramana w oprogramowaniu o otwartym kodzie źródłowym Gwyddion*, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki

Obecnie jestem **promotorem pomocniczym** jednej pracy doktorskiej z fizyki:

- Mgr inż. Michał Piskorski, *Wykorzystanie spektroskopii Ramana w badaniach materiałów niskowymiarowych*, Promotor: dr hab. Witold Kozłowski. Przewidywany czas złożenia pracy doktorskiej to koniec roku 2023.

Na Uniwersytecie Osakijskim byłem **opiekunem laboratoryjnym** studentów realizujących swoje prace licencjackie, magisterskie oraz doktorskie. Moja rola polegała na nauczaniu obsługi mikroskopu LT-STM (Unisoku), nadzorowaniu pracy studentów w laboratorium oraz pomocy przy wykonywaniu pomiarów mikroskopowych. Ponadto pomagałem przy interpretacji otrzymanych wyników doświadczalnych oraz planowaniu nowych badań. Byłem opiekunem laboratoryjnym następujących studentów:

- Takuro Tsuzuki, praca magisterska
- Yuto Minagawa, praca licencjacka oraz magisterska
- Songpol Chaunchaiyakul, praca magisterska oraz doktorska
- Nami Yajima, praca licencjacka
- Yuki Ito, praca licencjacka
- Masaki Okada, praca licencjacka

Byłem **opiekunem** dwóch studentów spoza Uniwersytetu Łódzkiego, którzy odbywali staż naukowy w laboratorium Katedry Fizyki Ciała Stałego. Moja rola polegała na nauczaniu obsługi aparatury pomiarowej dostępnej w Katedrze (m.in. aparatura próżniowa z naparowywarkami termicznymi – Oxford Instruments, mikroskop sił atomowych AFM – NT-MTD, spektrometr Ramana – SOL Instruments) nadzorowaniu pracy studentów, pomocy przy wykonywaniu pomiarów oraz interpretacji otrzymanych wyników doświadczalnych. Część wyników otrzymanych podczas staży została opublikowana we wspólnych pracach.

- Krzysztof Matuszek, student Wydziału Chemii Politechniki Łódzkiej, Termin stażu: 20.07.2021 – 27.08.2021, Tematyka stażu: *Badania Re_2O_7 oraz ReO_3 na powierzchni HOPG oraz Si nanoszonych w warunkach UHV oraz w powietrzu* [42]
- Mgr Jakub Kierdaszuk, doktorant Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Termin stażu: 4.03.2019 – 29.03.2019, Tematyka stażu: *Badania grafenu na nanodrutach GaN wzrastanych metodą MBE i słupkach GaN wytrawianych plazmą mierzone za pomocą spektroskopii Ramana oraz AFM* [43]

Byłem **opiekunem** jednego doktoranta zagranicznego odbywającego staż naukowy w KFCS w ramach Erasmus+ Mobility program.

- Msc Shankhanil Sarkar, Department of Physics, University of Kalyani, India, Termin stażu: 20.02.2023 – 30.06.2023, Tematyka stażu: *Different techniques used for growing and characterizing 2D materials, their Work Function tunability and Investigation on Transition Metal doped oxide Crystals using X-ray Photoelectron Spectroscopy*

Byłem **recenzentem** jednej pracy inżynierskiej na kierunku Informatyka

- Piotr Zieliński, *Aplikacja do wizualizacji struktur atomowych*, Promotor pracy: dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki, 2020

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

- Od dnia 10.10.2022 jestem **przedstawicielem do Rady Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ** w grupie nauczycieli akademickich, którzy nie posiadają tytułu profesora bądź doktora habilitowanego.
- W roku 2022 brałem udział w **tworzeniu specyfikacji technicznej** na *Dostawę i instalację zestawu ultra-wysokiej próżni (UHV) wyposażonego w głowicę STM pracującą w temperaturach helowych*. Zakup mikroskopu STM został dokonany ze środków wewnętrznych Uniwersytetu Łódzkiego a jego instalacja została wykonana w lipcu 2023 r. Ponadto byłem odpowiedzialny za generalny remont piwnicznego pokoju laboratoryjnego wyposażonego w specjalną antywibracyjną płytą fundamentową przeznaczoną do instalacji mikroskopu LT-STM. Byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie testów SAT (Site Acceptance Test) mikroskopu LT-STM podczas instalacji.
- W roku 2020 brałem udział w pisaniu **wniosku o finansowanie projektu badawczego** w konkursie *Granty aparaturowe*, finansowanego w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB). Projekt otrzymał finansowanie na zakup aparatury naukowo-badawczej w kwocie 100 000 zł (decyzja nr 9/GA22/2021).
- W roku 2020 brałem udział w pisaniu **wniosku w sprawie przyznania środków finansowych** na realizację inwestycji związanej z działalnością naukową na zakup *Atomowo rozdzielczego mikroskopu LHe STM/AFM do badań nowoczesnych materiałów w polu magnetycznym 8T*. Wniosek mimo pozytywnych recenzji zostały niezakwalifikowany do finansowania przez Ministra Edukacji i Nauki. Nr rejestracyjny wniosku: IA/SP/490074/2021.
- W latach 2017, 2018 brałem udział w pisaniu **wniosku o przyznanie dotacji na inwestycję w zakresie dużej infrastruktury badawczej** na *Doposażenie laboratorium dedykowanego do badań hybrydowych układów dwuwymiarowych w niskotemperaturowy mikroskop STM/AFM pracujący w polu magnetycznym z obrazowaniem topograficzno-spektroskopowym w skali atomowej*. Wnioski mimo pozytywnych recenzji zostały niezakwalifikowane do finansowania przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Nr rejestracyjne wniosków: IA/SP/0444/2018, IA/SP/0374/2019.

- W roku 2018 byłem odpowiedzialny za **napisanie porozumienia o współpracy naukowej i dydaktycznej** pt. „*Memorandum of Understanding between Faculty of Physics and Applied Informatics, University of Lodz, Poland and Graduate School of Engineering, Osaka University, Japan*”. Porozumienie zostało podpisane w grudniu 2018 przez Dziekanów poszczególnych Wydziałów.
- W roku 2017 **pozyskałem w formie darowizny** dla Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej aparaturę pomiarową ultra-wysokiej próżni (Oxford Instruments) wyposażoną w mikroskop STM, kwadropolowy spektrometr masowy oraz system dyfrakcji elektronów niskich energii (LEED). Darowizna pochodziła od mojego byłego przełożonego prof. Yuji Kuwahary z Uniwersytetu Osakijskiego.
- W roku 2017 pełniłem funkcję **Koordynatora Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ ds. rekrutacji kandydatów z zagranicy** na studia na kierunek *Nanotechnology*

6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę

- **Wywiad** udzielony wraz z dr hab. Pawłem Kowalczykiem, prof. UŁ pt. *Wyświetlacz OLED na grafenie fizyków z Uniwersytetu Łódzkiego. Pierwszy w Polsce*. Wywiad został opublikowany na stronach Uniwersytetu Łódzkiego w sekcji aktualności w dniu 08.11.2021.
<https://www.uni.lodz.pl/aktualnosc/szczegoly/wyswietlacz-oled-na-grafenie-fizykow-z-uniwersytetu-lodzkiego-pierwszy-w-polsce>

Wywiad został bardzo szeroko zauważony w Polsce a jego przedruki można znaleźć m.in. na następujących portalach internetowych:

glowny-mechanik.pl, mlodytechnik.pl, scienceinpoland.pap.pl, biznes.wprost.pl,
www.msn.com, komputerswiat.pl, www.gov.pl, dzienniknaukowy.pl, antyweb.pl,
tabletowo.com, android.com.pl, forumakademickie.pl, liderzyinnowacyjnosci.com,
wolnemedi.net, bomega.pl, naukawpolsce.pl.

- **Wywiad do portalu PAP - Nauka w Polsce** do artykułu pt. *Po drugiej stronie lustra: badając "życie" chiralnych molekuł*, Artykuł z dnia 25.08.2021:
<https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C88997%2Cpo-drugiej-stronie-lustra-badajac-zycie-chiralnych-molekul.html>
- **Wywiad do audycji radiowej Szkiełko i oko** w Radio Łódź pt. *Badania nad chiralnością*, Emisja odbyła się w dniu 06.08.2018
- **Wywiad do portalu PAP - Nauka w Polsce** do artykułu pt. *Naukowcy budują unikalny spektrometr o doskonałej rozdzielczości*, Artykuł z dnia 11.04.2018:
<https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C29032%2Cnaukowcy-buduja-unikalny-spektrometr-o-doskonalej-rozdzielczosci.html>
- W latach 2007, 2008, 2009, będąc na studiach doktoranckich, brałem **aktywny udział w prezentacji zjawisk fizycznych w dwudniowym Pikniku Naukowym** w łódzkiej Manufakturze.

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

7.1 Udział w szkołach letnich

- **16th International Summer Schools on Nanosciences & Nanotechnologies, Organic Electronics and Nanomedicine (ISSON22)**, Thessaloniki, Greece, 02 – 10 July 2021
- **24th International Krutyń Summer School**, "Next Generation Organic Light-Emitting Devices", Krutyń, Poland, 1 – 7 September 2019
- **22nd International Krutyń Summer School**, "State of the Art Organic-only TADF OLEDs. From Theory to Applications", Krutyń, Poland, 22 – 26 May 2017
- **Summer School "Frontier research on 2D materials"**, Corsica, France, 2 – 13 April 2018
- **Summer School Nanomagnetism and Spintronics**, Prague, Czech Republic, 5 – 13 September 2008

7.2 Udział w kursach

- **Letnia Szkoła NetAcad dla Instruktorów 2022, Zdalny kurs instruktorski w zakresie 1. części CCNA v7 (Wprowadzenie do Sieci), 30 godzin, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie**
- **CCNA SRWE dla Instruktorów 2023, Zdalny kurs instruktorski w zakresie 2. części CCNA v7 (Podstawy przełączania, routingu i łączności bezprzewodowe), 30 godzin, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie**
- **IV Szkoła techniki próżniowej pod patronatem Polskiego Towarzystwa Próżniowego, Kraków 19 – 23 lipca 2010**
- **Kurs kwalifikacyjny pedagogiczny dla czynnych zawodowo nauczycieli, Łódzkie Centrum Doskonalenia Nauczycieli i Kształcenia Praktycznego, 270 godzin, 2010**

7.3 Nagrody, stypendia i wyróżnienia

- Nagroda Rektora Uniwersytetu Łódzkiego. **Nagroda zespołowa stopnia pierwszego** za cykl 25 publikacji pt. *„Fizyka w nanoskali: badania materiałów niskowymiarowych”*, 30 października 2020 r, zespół w składzie: dr hab. Paweł Kowalczyk, dr hab. Witold Kozłowski, dr Maciej Rogala, dr Paweł Dąbrowski, dr Paweł Krukowski, prof. dr hab. Zbigniew Klusek
- **Naroda za najlepszy poster czwartej sesji, Best Poster – Session Four, Discovering & Exploring New Nanoscale Frontiers**, Nanomeasure2013, University of Warsaw, Poland, 25 – 26 June 2013
- Stypendium *JSPP Postdoctoral Fellowships for Foreign Researchers* na odbycie 24-miesięcznego stażu podoktorskiego w grupie prof. Fumio Komori w Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Japan, Decyzja ID No. 10322
- **Stypendium dla uczestników studiów doktoranckich** finansowane ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz budżetu państwa w ramach działania 2.6 Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego pt.: *„Stypendia wspierające innowacyjne badania naukowe doktorantów”*. Temat finansowanego projektu:

„Badania warstw molekuł organicznych zawierających stabilne wolne rodniki osadzonych na podłożu Au(111) i HOPG(0001)”, Nr umowy stypendialnej 29/S-UŁ/2009

- Stypendium na wyjazd na studia zagraniczne w ramach programu Erasmus w Institute for Molecules and Materials, Radboud University of Nijmegen, The Netherlands. Termin wyjazdu: 2006.09.10 – 2007.01.25
- Nagroda II stopnia Dziekana Wydziału Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego za prezentowany temat pracy dyplomowej: „Rezonans spinowo-elektronowy. Spektroskopia EPR w skali molekularnej”, VII Sesja Posterowa Tematów Prac Dyplomowych Środowiska


LITERATURA

- [1] P. Peluso, B. Chankvetadze, *Recognition in the Domain of Molecular Chirality: From Noncovalent Interactions to Separation of Enantiomers*, Chem. Rev. 122 (2022) 13235. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00846>.
- [2] C. Lee, J.M. Weber, L.E. Rodriguez, R.Y. Sheppard, L.M. Barge, E.L. Berger, A.S. Burton, *Chirality in Organic and Mineral Systems: A Review of Reactivity and Alteration Processes Relevant to Prebiotic Chemistry and Life Detection Missions*, Symmetry 14 (2022) 460. <https://doi.org/10.3390/sym14030460>.
- [3] M. Gingras, *One hundred years of helicene chemistry. Part 1: non-stereoselective syntheses of carbohelicenes*, Chem. Soc. Rev. 42 (2013) 968. <https://doi.org/10.1039/C2CS35154D>.
- [4] M. Gingras, G. Félix, R. Peresutti, *One hundred years of helicene chemistry. Part 2: stereoselective syntheses and chiral separations of carbohelicenes*, Chem. Soc. Rev. 42 (2013) 1007. <https://doi.org/10.1039/C2CS35111K>.
- [5] M. Gingras, *One hundred years of helicene chemistry. Part 3: applications and properties of carbohelicenes*, Chem. Soc. Rev. 42 (2013) 1051. <https://doi.org/10.1039/C2CS35134J>.
- [6] K.-H. Ernst, *Stereochemical Recognition of Helicenes on Metal Surfaces*, Acc. Chem. Res. 49 (2016) 1182. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00110>.
- [7] K.-H. Ernst, M. Parschau, R. Fasel, *Differences in two-dimensional crystal structures: Racemic and enantiopure heptahelicene on Cu(111)*, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. 2 (2004) 136. <https://doi.org/10.1380/ejsnt.2004.136>.
- [8] R. Fasel, M. Parschau, K.-H. Ernst, *Amplification of chirality in two-dimensional enantiomorphous lattices*, Nature. 439 (2006) 449. <https://doi.org/10.1038/nature04419>.

- [9] M. Parschau, R. Fasel, K.-H. Ernst, *Coverage and Enantiomeric Excess Dependent Enantiomorphism in Two-Dimensional Molecular Crystals*, *Cryst. Growth Des.* 8 (2008) 1890. <https://doi.org/10.1021/cg701100r>.
- [10] R. Fasel, M. Parschau, K.-H. Ernst, *Chirality Transfer from Single Molecules into Self-Assembled Monolayers*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 42 (2003) 5178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.200352232>.
- [11] J. Seibel, L. Zoppi, K.-H. Ernst, *2D conglomerate crystallization of heptahelicene*, *Chem. Commun.* 50 (2014) 8751. <https://doi.org/10.1039/C4CC03574G>.
- [12] J. Seibel, M. Parschau, K.-H. Ernst, *Double layer crystallization of heptahelicene on noble metal surfaces*, *Chirality.* 32 (2020) 975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/chir.23235>.
- [13] R. Fasel, A. Cossy, K.-H. Ernst, F. Baumberger, T. Greber, J. Osterwalder, *Orientation of chiral heptahelicene C₃₀H₁₈ on copper surfaces: An x-ray photoelectron diffraction study*, *J. Chem. Phys.* 115 (2001) 1020. <https://doi.org/10.1063/1.1377886>.
- [14] M. Baljozović, A.L. Fernandes Cauduro, J. Seibel, A. Mairena, S. Grass, J. Lacour, A.K. Schmid, K.-H. Ernst, *Growth Dynamics and Electron Reflectivity in Ultrathin Films of Chiral Heptahelicene on Metal (100) Surfaces Studied by Spin-Polarized Low Energy Electron Microscopy*, *Phys. Status Solidi B.* 258 (2021) 2100263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pssb.202100263>.
- [15] M. Parschau, U. Ellerbeck, K.-H. Ernst, *Chirality transfer by epitaxial mismatch in multi-layered homochiral molecular films*, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 354 (2010) 240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.06.008>.
- [16] J. Seibel, L. Zoppi, K.-H. Ernst, *2D conglomerate crystallization of heptahelicene*, *Chem. Commun.* 50 (2014) 8751. <https://doi.org/10.1039/C4CC03574G>.
- [17] K.-H. Ernst, Y. Kuster, R. Fasel, C.F. McFadden, U. Ellerbeck, *Adsorption of helical aromatic molecules: heptahelicene on Ni(111)*, *Surf. Sci.* 530 (2003) 195.. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(03\)00489-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028(03)00489-8).
- [18] K.-H. Ernst, M. Neuber, M. Grunze, U. Ellerbeck, *NEXAFS Study on the Orientation of Chiral P-Heptahelicene on Ni(100)*, *J. Am. Chem Soc.* 123 (2001) 493. <https://doi.org/10.1021/ja003262+>.
- [19] J. Seibel, M. Parschau, K.-H. Ernst, *Two-Dimensional Crystallization of Enantiopure and Racemic Heptahelicene on Ag(111) and Au(111)*, *J. Phys. Chem. C.* 118 (2014) 29135. <https://doi.org/10.1021/jp504673g>.
- [20] K.-H. Ernst, S. Baumann, C.P. Lutz, J. Seibel, L. Zoppi, A.J. Heinrich, *Pasteur's Experiment Performed at the Nanoscale: Manual Separation of Chiral Molecules, One by One*, *Nano Lett.* 15 (2015) 5388. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01762>.
- [21] M. Baljozović, B. Arnoldi, S. Grass, J. Lacour, M. Aeschlimann, B. Stadtmüller, K.-H. Ernst, *Spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy study of heptahelicene layers on Cu(111) surfaces*, *J. Chem. Phys.* 159 (2023) 044701. <https://doi.org/10.1063/5.0156581>.
- [22] M. Taniguchi, H. Nakagawa, A. Yamagishi, K. Yamada, *STM observation of thia[11]heterohelicene on gold(111) and gold(110) surface*, *Surf. Sci.* 507–510 (2002) 458. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)01285-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01285-2).
- [23] M. Taniguchi, H. Nakagawa, A. Yamagishi, K. Yamada, *Molecular chirality on a solid surface: thiaheterohelicene monolayer on gold imaged by STM*, *Surf. Sci.* 454–456 (2000) 1005. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(00\)00174-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028(00)00174-6).

- [24] B.C. Baciú, T. de Ara, C. Sabater, C. Untiedt, A. Guijarro, *Helical nanostructures for organic electronics: the role of topological sulfur in ad hoc synthesized dithia[7]helicenes studied in the solid state and on a gold surface*, *Nanoscale Adv.* 2 (2020) 1921. <https://doi.org/10.1039/D0NA00045K>.
- [25] C.N.R. Rao, A.K. Sood, K.S. Subrahmanyam, A. Govindaraj, *Graphene: The New Two-Dimensional Nanomaterial*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 48 (2009) 7752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.200901678>.
- [26] S. Naghdi, G. Sanchez-Arriaga, K.Y. Rhee, *Tuning the work function of graphene toward application as anode and cathode*, *J. Alloys Compd.* 805 (2019) 1117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.187>.
- [27] D. Yonar, A. Kılıç Süloğlu, G. Selmanoğlu, M.M. Sünnetçioğlu, *An Electron paramagnetic resonance (EPR) spin labeling study in HT-29 Colon adenocarcinoma cells after Hypericin-mediated photodynamic therapy*, *BMC Mol. Cell Biol.* 20 (2019) 16. <https://doi.org/10.1186/s12860-019-0205-4>.
- [28] P. Krukowski, Z. Klusek, W. Olejniczak, R. Klepaczko, M. Puchalski, P. Dabrowski, P.J. Kowalczyk, K. Gwozdziński, *Self-assembled monolayers of radical molecules physisorbed on HOPG(0001) substrate studied by scanning tunnelling microscopy and electron paramagnetic resonance techniques*, *Appl Surf Sci.* 255 (2009) 8769. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.06.035>.
- [29] X. Liu, B. Lu, T. Iimori, K. Nakatsuji, F. Komori, *Self-Assembled MnN Superstructure*, *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007) 66103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.066103>.
- [30] B. Lu, X. Liu, K. Nakatsuji, T. Iimori, F. Komori, *Fabrication and characterization of self-organized MnN superstructures on Cu(001) surfaces*, *Phys. Rev. B.* 76 (2007) 245433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.245433>.
- [31] P. Krukowski, T. Iimori, K. Nakatsuji, M. Yamada, F. Komori, *Growth and structure of CrN nanoislands on Cu(001) studied by scanning tunneling microscopy and X-ray photoemission spectroscopy*, *Thin Solid Films.* 531 (2013) 251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.026>.
- [32] P. Krukowski, T. Iimori, K. Nakatsuji, M. Yamada, F. Komori, *Fabrication and characterization of strain-driven self-assembled CrN nanoislands on Cu(001)*, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 174309. <https://doi.org/10.1063/1.4803690>.
- [33] P. Krukowski, T. Hattori, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Light Emission from M-Type Enantiomer of 2,13-bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules Adsorbed on Au(111) and C₆₀/Au(111) Surfaces Investigated by STM-LE*, *Int. J. Mol. Sci.* 23 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms232315399>.
- [34] P. Krukowski, T. Hattori, M. Okada, M. Piskorski, I. Lutsyk, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Study of stereochemical crystallization of racemic mixtures of [5] and [7]thiaheterohelicene molecules on Ag(111) surface by scanning tunneling microscopy and Raman scattering spectroscopy*, *Appl. Surf. Sci.* 589 (2022) 152860. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152860>.
- [35] P. Krukowski, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, N. Yajima, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, Y. Miyake, M. Katayama, Y. Kuwahara, *Detection of Light Emission from (S)-PTCDI Molecules Adsorbed on Au(111) and NiAl(110) Surfaces Induced by a Scanning Tunneling Microscope*, *J. Phys. Chem. C* 120 (2016) 3964. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12313>.
- [36] P. Krukowski, S. Chaunchaiyakul, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Adsorption and light emission of a racemic mixture of [7]thiaheterohelicene-2,13-carboxaldehyde on Au(111), Cu(001), and NiAl(110) surfaces investigated using a scanning tunneling microscope*, *J. Phys. Chem. C* 125 (2021) 9419. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c01091>.

- [37] S. Chaunchaiyakul, P. Krukowski, T. Tsuzuki, Y. Minagawa, M. Akai-Kasaya, A. Saito, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Self-Assembly Formation of M-Type Enantiomer of 2,13-Bis(hydroxymethyl)[7]-thiaheterohelicene Molecules on Au(111) Surface Investigated by STM/CITS*, J. Phys. Chem. C. 119 (2015) 21434. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b04961>.
- [38] S. Chaunchaiyakul, A. Setiadi, P. Krukowski, F.C.I. Catalan, M. Akai-Kasaya, A. Saito, N. Hayazawa, Y. Kim, H. Osuga, Y. Kuwahara, *Nanoscale Dehydrogenation Observed by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy*, J. Phys. Chem. C 121 (2017) 18162. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03352>.
- [39] P. Krukowski, S. Chaunchaiyakul, Y. Minagawa, N. Yajima, M. Akai-Kasaya, A. Saito, Y. Kuwahara, *Anomalous hexagonal superstructure of aluminum oxide layer grown on NiAl(110) surface*, Nanotechnology. 27 (2016) 455708. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/45/455708>.
- [40] S. Chaunchaiyakul, T. Yano, K. Khokklang, P. Krukowski, M. Akai-Kasaya, A. Saito, Y. Kuwahara, *Nanoscale analysis of multiwalled carbon nanotube by tip-enhanced Raman spectroscopy*, Carbon 99 (2016) 642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.12.090>.
- [41] S. Chaunchaiyakul, T. Yano, P. Krukowski, Y. Kuwahara, *Effect of surface tension on self-termination in Au tip fabrication for tip-enhanced Raman spectroscopy*, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 98003. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.098003>.
- [42] P. Krukowski, M. Piskorski, R. Udovyt'ska, D.A. Kowalczyk, I. Lutsyk, M. Rogala, P. Dąbrowski, W. Kozłowski, B. Łuszczyn'ska, J. Jung, J. Ulański, K. Matuszek, A. Nadolska, P. Przybysz, W. Ryś, K. Toczek, R. Dunal, P. Krempieński, J. Czerwińska, M. Le Ster, M. Skulimowski, P.J. Kowalczyk, *Graphene on quartz modified with rhenium oxide as a semitransparent electrode for organic electronics*, Opto-Electron. Rev. 30 (2022) e141953. <https://doi.org/10.24425/opelre.2022.141953>.
- [43] J. Kierdaszuk, P. Dąbrowski, M. Rogala, P. Krukowski, A. Przewłoka, A. Krajewska, W. Kaszub, M. Sobanska, Z.R. Zyt'kiewicz, V.Z. Zubialevich, P.J. Kowalczyk, A. Wymołek, J. Binder, A. Drabińska, *Strain control in graphene on GaN nanowires: Towards pseudomagnetic field engineering*, Carbon 186 (2022) 128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.10.012>.

 Dokument podpisany
przez Paweł Krukowski
Data: 2023.09.30
22:49:58 CEST
.....

(podpis wnioskodawcy)

