

Warstwowe materiały van der Waalsa dla nowoczesnej optoelektroniki

Maciej Molas

Nagroda im. Profesora Stefana Pieńkowskiego



Marek
Maria
Pienkowski
Foundation



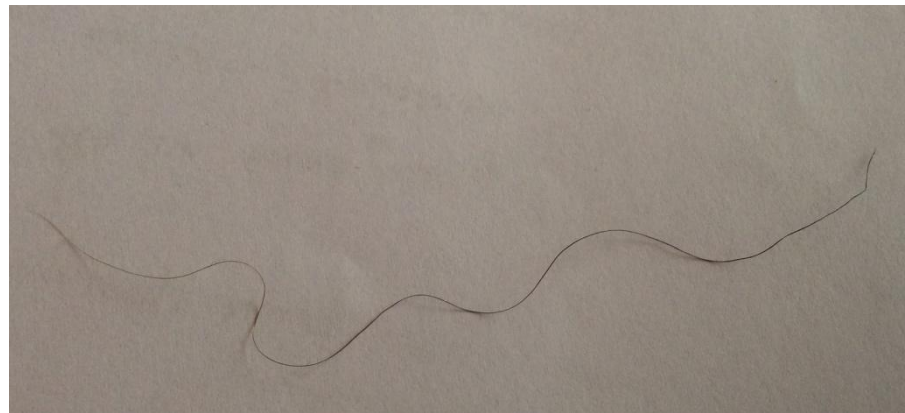
14.04.2025



Plan prezentacji

- **Warstwowe materiały van der Waalsa** – zainteresowania naukowe
- **Techniki eksperymentalne** – metody badawcze + laboratorium
- **Najważniejsze osiągnięcia naukowe** – kompleksy ekscytonowe
- **Ścieżka zawodowa + dorobek naukowy**
- **Grupa badawcza Laboratorium Spektroskopii Optycznej**
- **Współpraca międzynarodowa**
- **Podsumowanie**

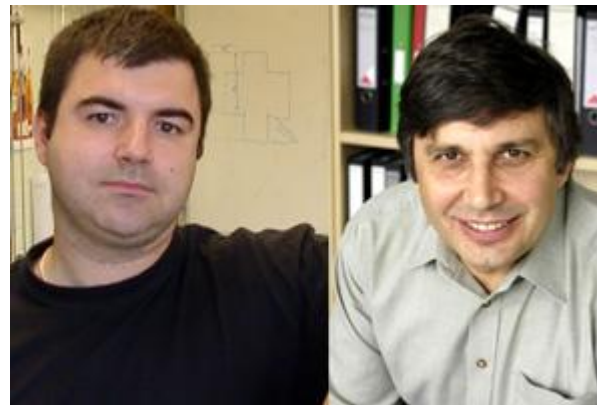
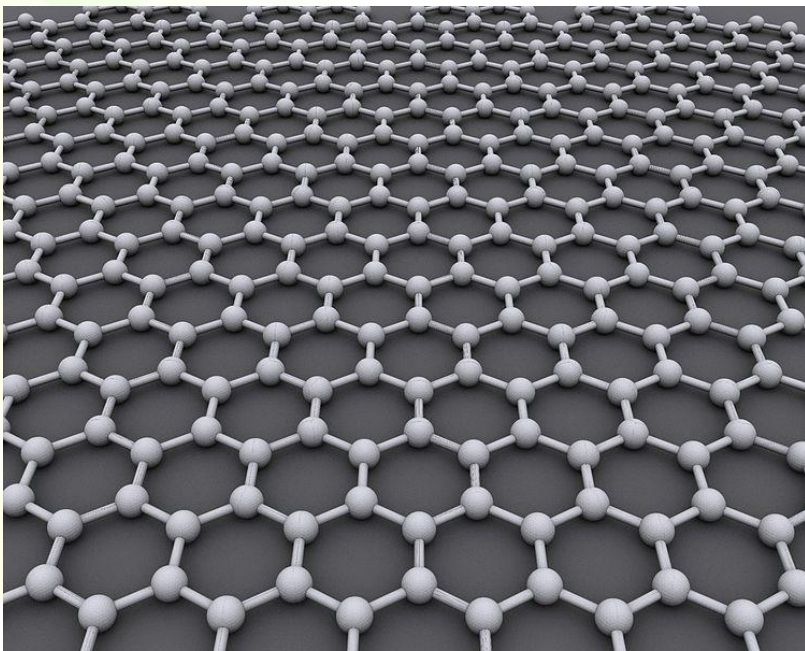
Zainteresowania naukowe



Zainteresowania naukowe

materiały warstwowe van der Waalsa

grafen



**Konstantin
Novoselov**

**Andre
Geim**

2010



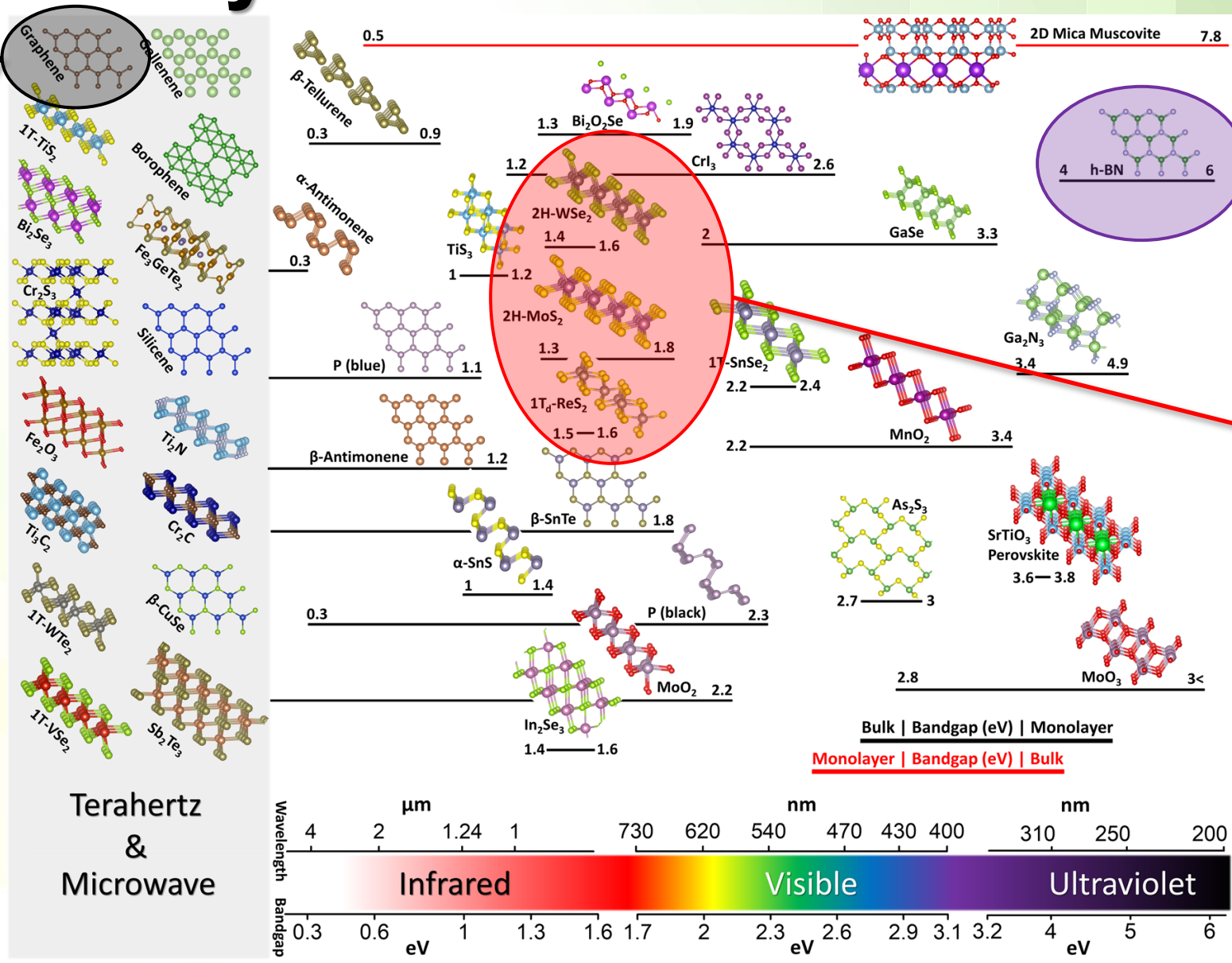
Materialy warstwowe van der Waalsa

Graphene family	Graphene	hBN 'white graphene'	BCN	Fluorographene	Graphene oxide
2D chalcogenides	MoS ₂ , WS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂		Semiconducting dichalcogenides: MoTe ₂ , WTe ₂ , ZrS ₂ , ZrSe ₂ and so on	Metallic dichalcogenides: NbSe ₂ , NbS ₂ , TaS ₂ , TiS ₂ , NiSe ₂ and so on	
				Layered semiconductors: GaSe, GaTe, InSe, Bi ₂ Se ₃ and so on	
2D oxides	Micas, BSCCO	MoO ₃ , WO ₃	Perovskite-type: LaNb ₂ O ₇ , (Ca,Sr) ₂ Nb ₃ O ₁₀ , Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂ , Ca ₂ Ta ₂ TiO ₁₀ and so on		Hydroxides: Ni(OH) ₂ , Eu(OH) ₂ and so on
	Layered Cu oxides	TiO ₂ , MnO ₂ , V ₂ O ₅ , TaO ₃ , RuO ₂ and so on			Others

A. Geim et al., Nature 499, 419 (2013)

Materialy warstwowe van der Waalsa

**grafen
metal**



**heksagonalny
azotek boru (hBN)
izolator**

**dichalkogenki
metali
przejściowych
(np. MoS₂, WSe₂, ReS₂)
półprzewodniki**

A. Chaves et al., npj 2D
Materials and Applications
4, 29 (2020)

Dichalkogenki metali przejściowych

"The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties"

J.A. Wilson & A.D. Yoffe,
Advances in Physics 18, 193 (1969)

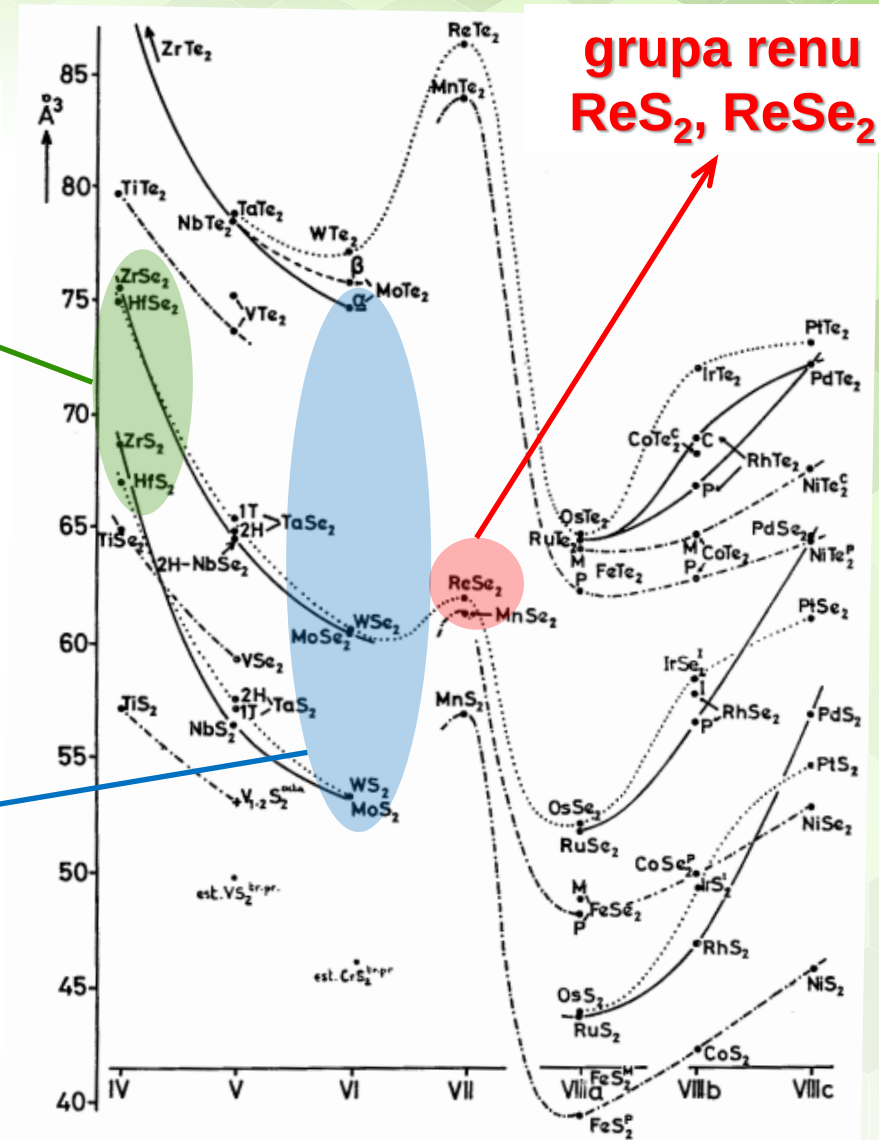


M – atom metalu przejściowego (Mo, Nb etc.)

X – atom chłogenu (S, Se lub Te)

grupa hafnu i cyrkonu
 HfS_2 , HfSe_2 , ZrS_2 , ZrSe_2

grupa molibdenu i wolfranu
 MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , MoTe_2

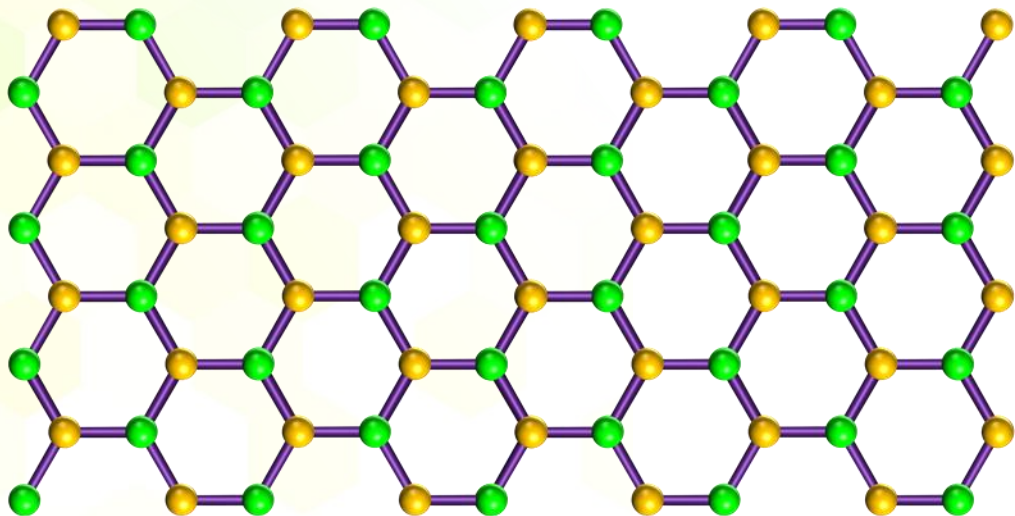
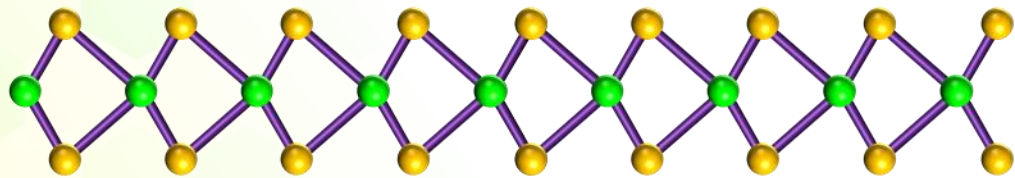


Dichalkogenki metali przejściowych



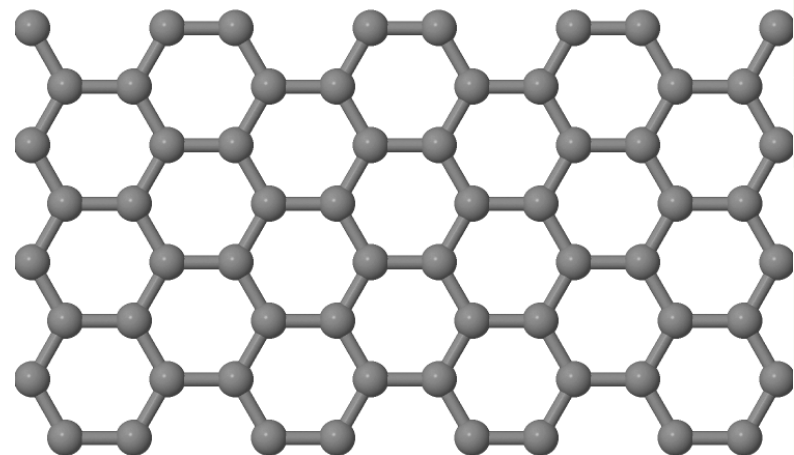
M – metal przejściowy – Mo lub W

X – chłkogen – S, Se lub Te



- Heksagonalna struktura krystaliczna
- Silne wiązania kowalencyjne w ramach warstwy X-M-X
- **Słabe wiązania van der Waals między kolejnymi warstwami**

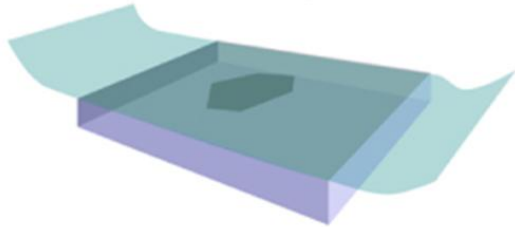
analog **grafenu**



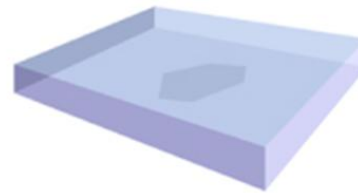
Cienkie warstwy - otrzymywanie

eksfoliacja mechaniczna + deterministyczny transfer

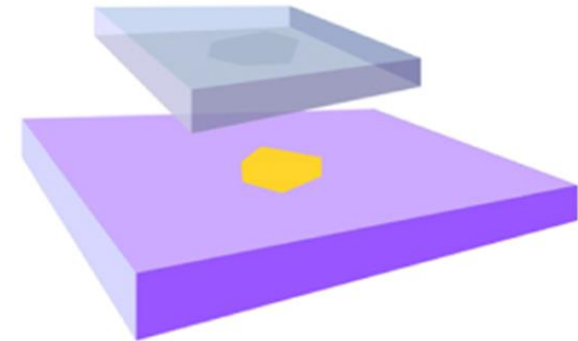
Flakes are transferred onto the stamp by exfoliation with tape



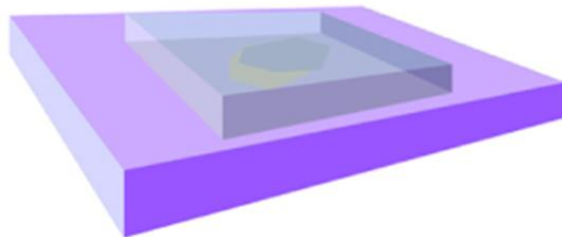
The stamp is turned upside down



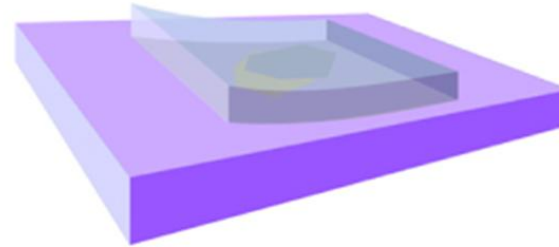
The flake is aligned on top of the target substrate



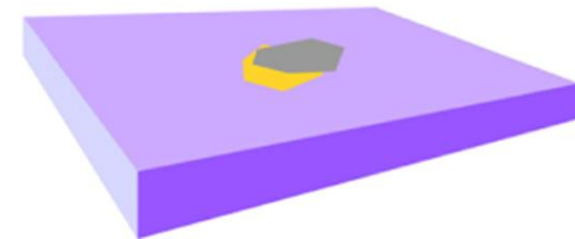
The stamp is pressed against the substrate



The stamp is peeled off very slowly

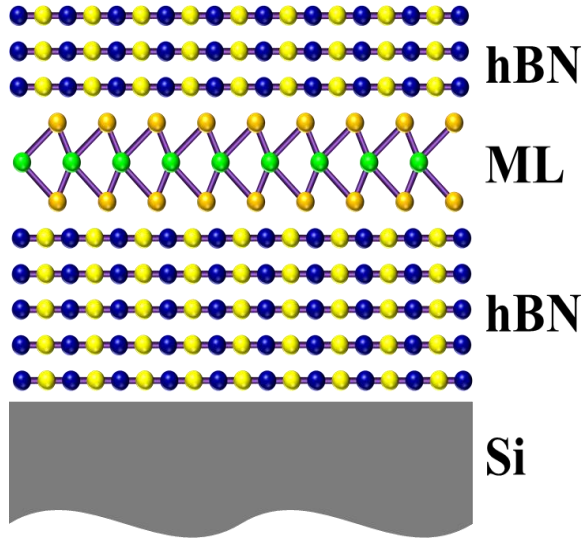


The flake has been transferred

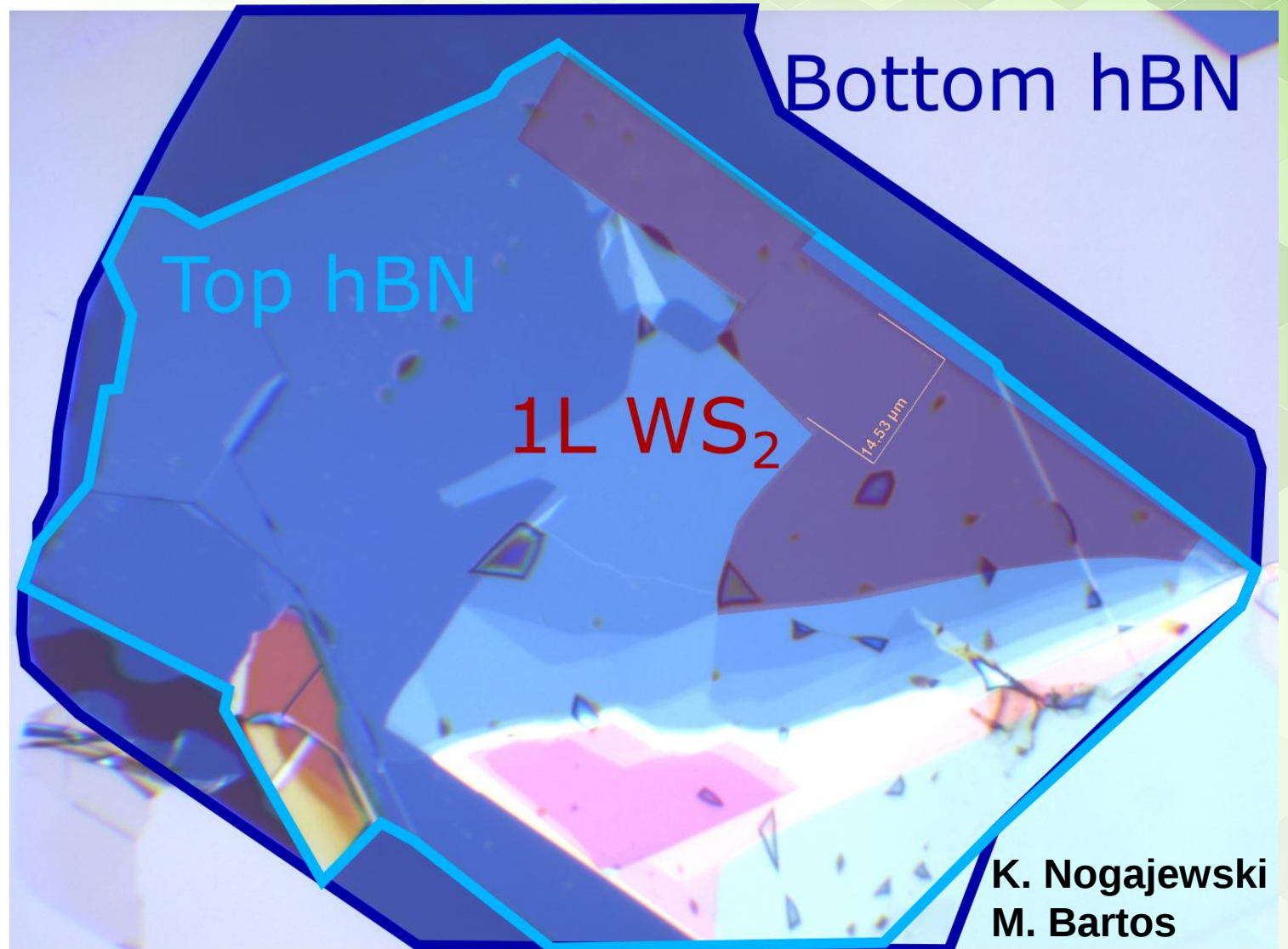


A. Castellanos-Gomez et al., 2D Materials 1, 011002 (2014)

Cienkie warstwy - otrzymywanie

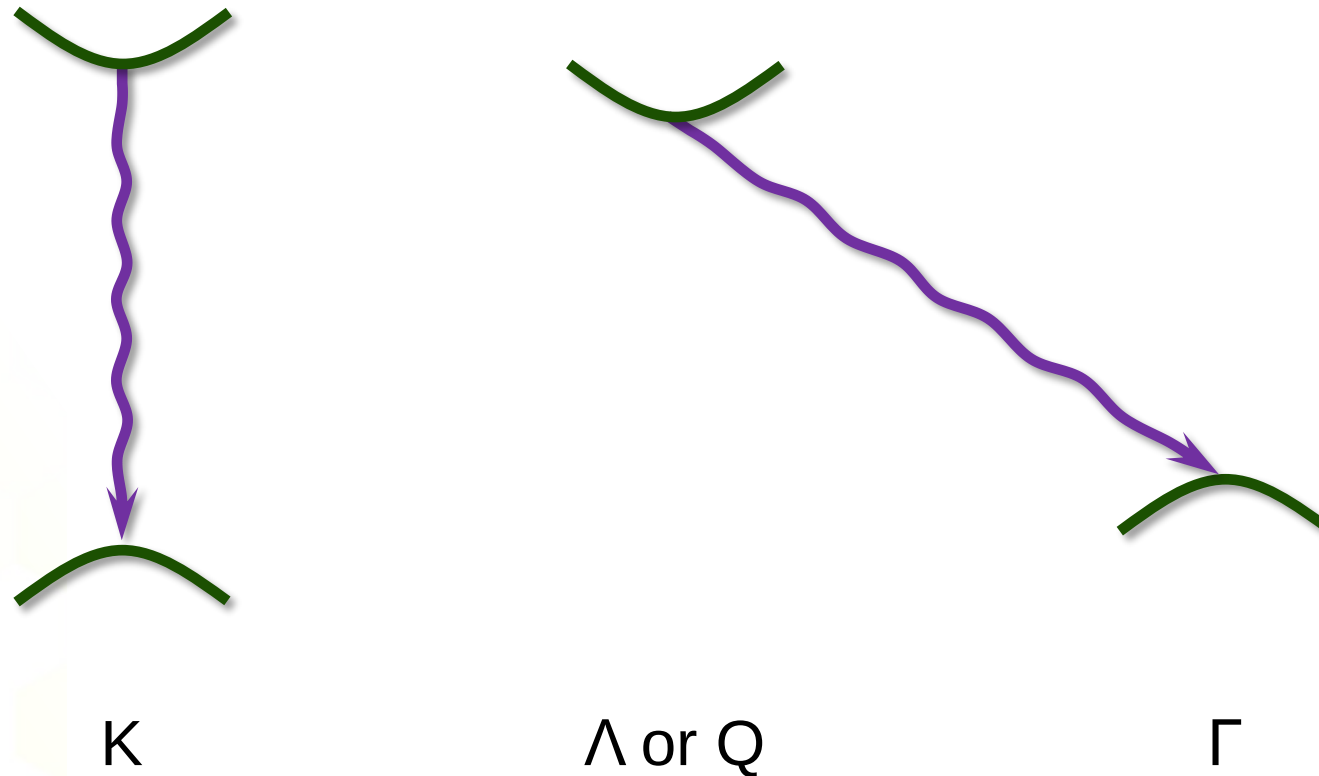


**rekordowa próbka
wytworzona w
grudniu 2016 roku!**



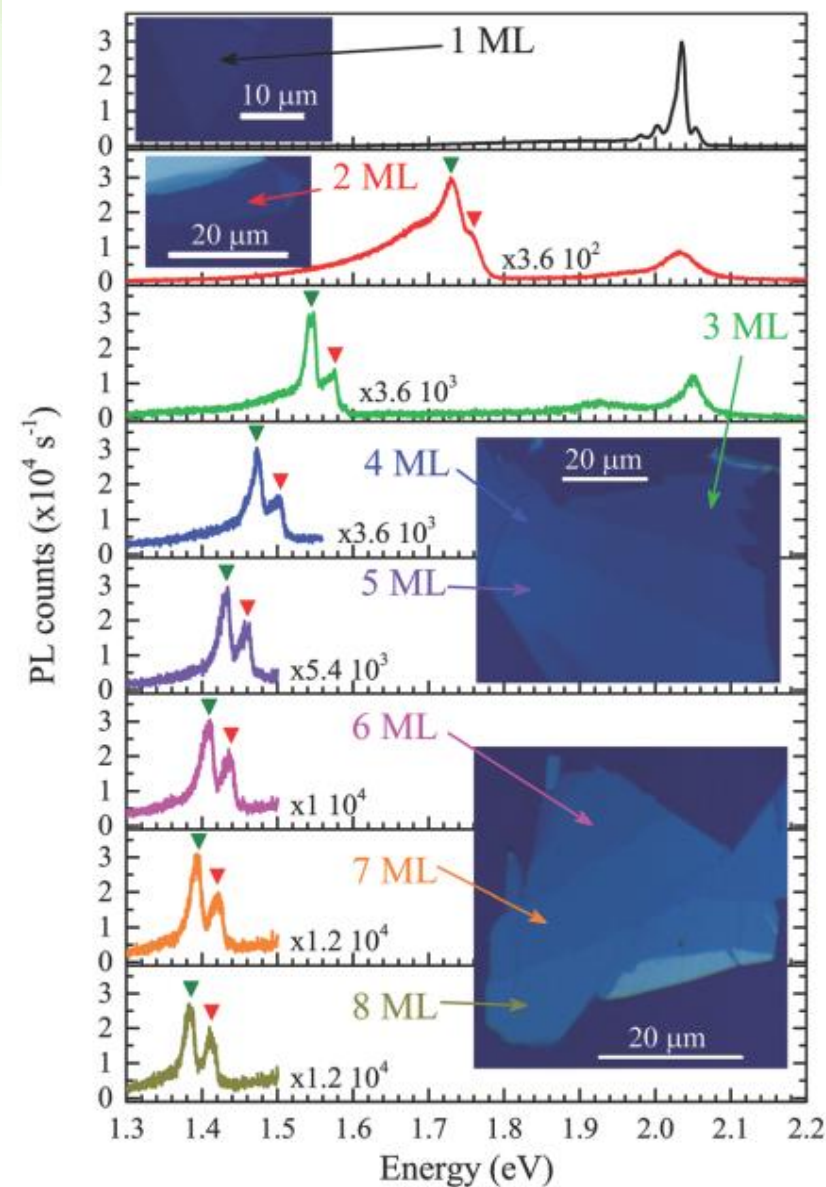
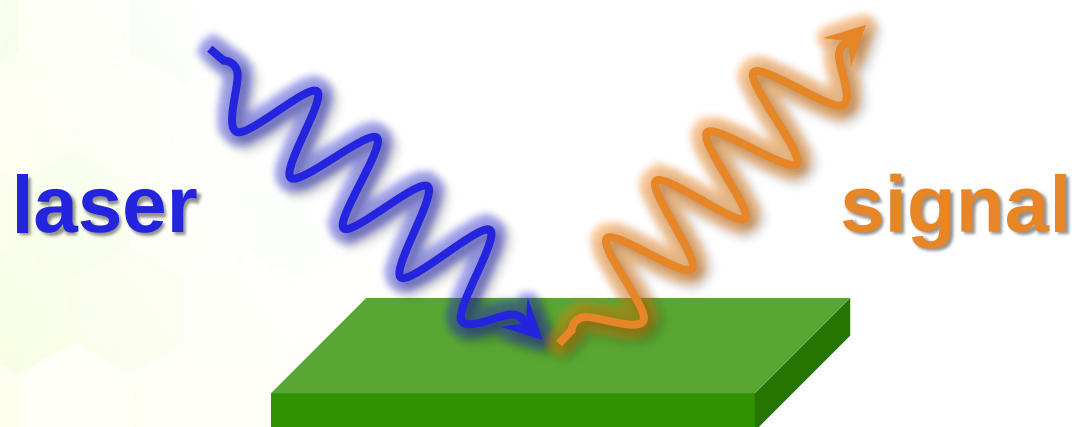
WS_2 – odpowiedź optyczna

materiałowy
– skośća przerw energetycznych



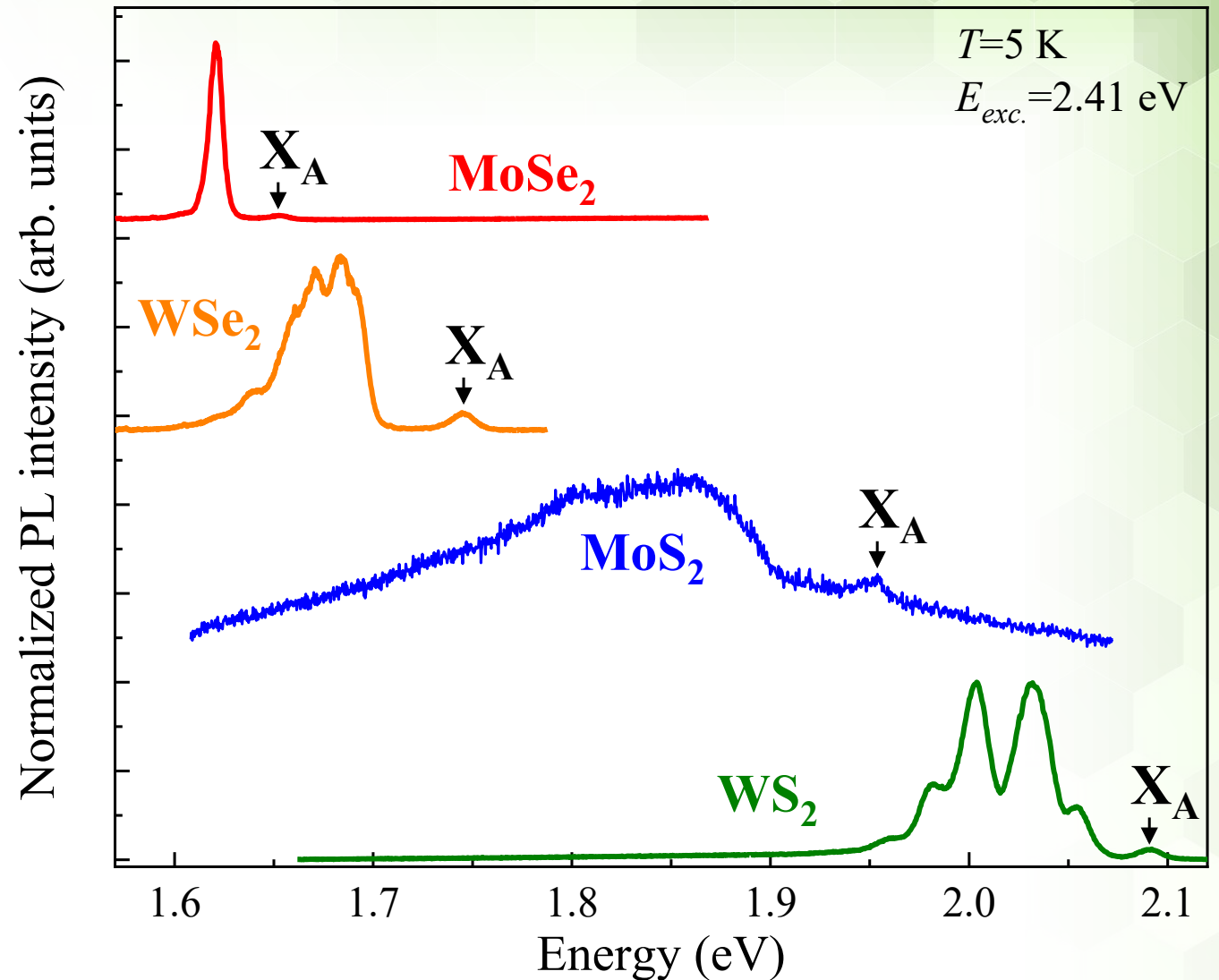
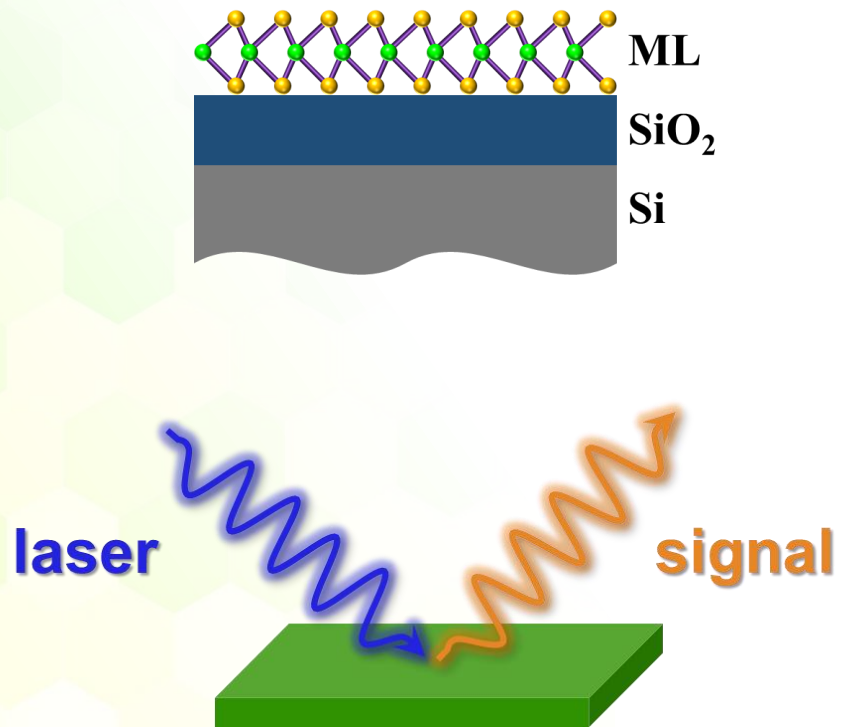
WS₂ – odpowiedź optyczna

fotoluminescencja

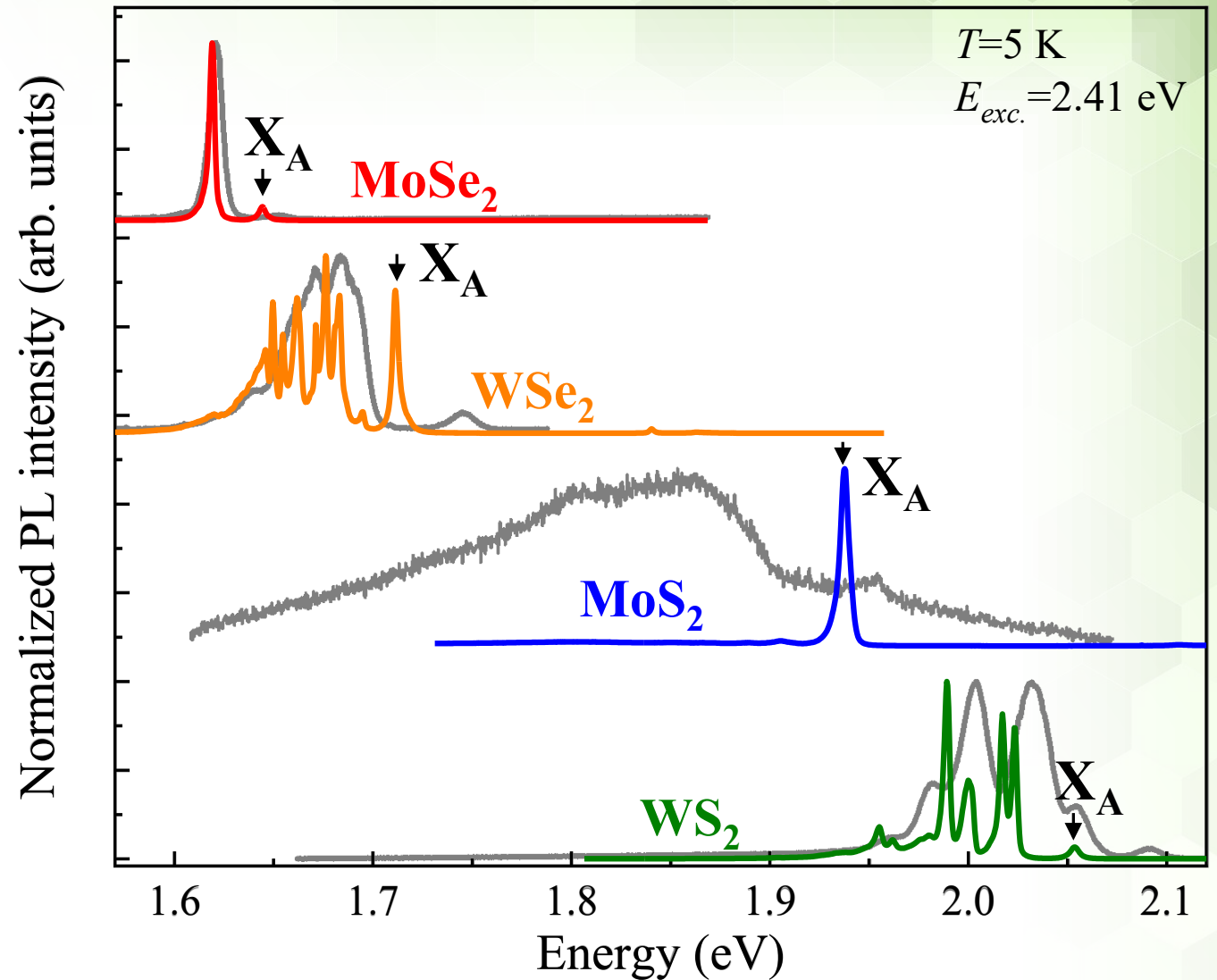
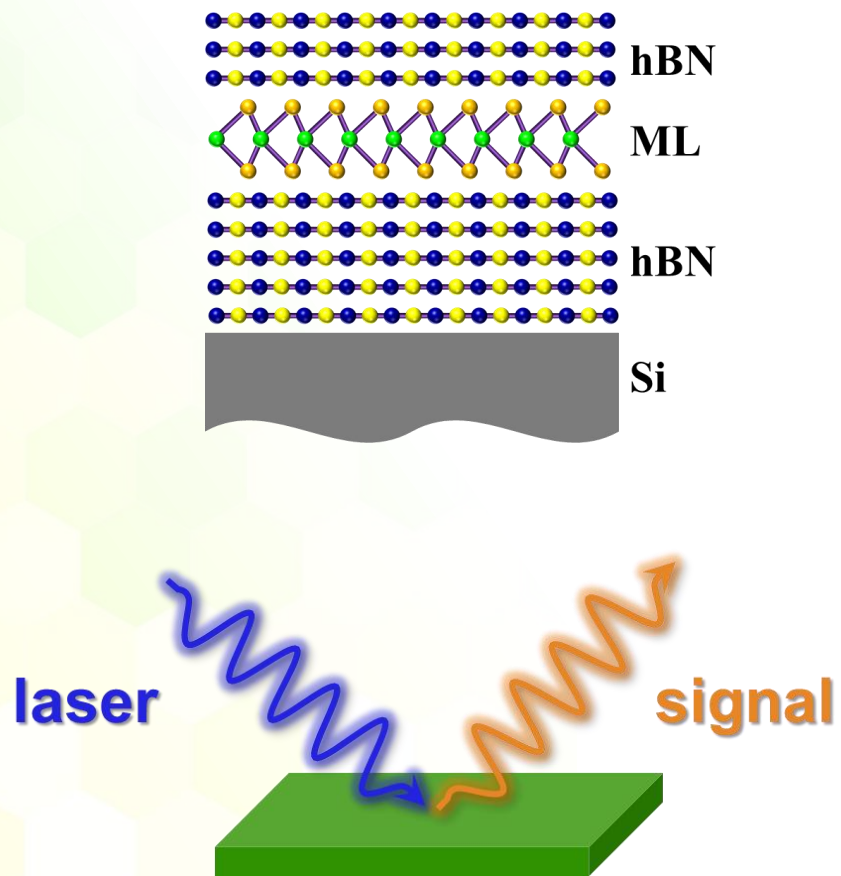


M. R. Molas et al., *Nanoscale* 9, 13128 (2017)

Widma fotoluminescencji monowarstw



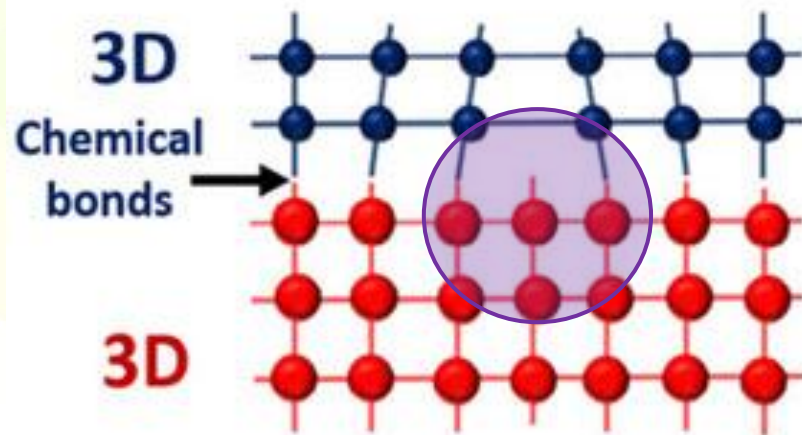
Widma fotoluminescencji monowarstw



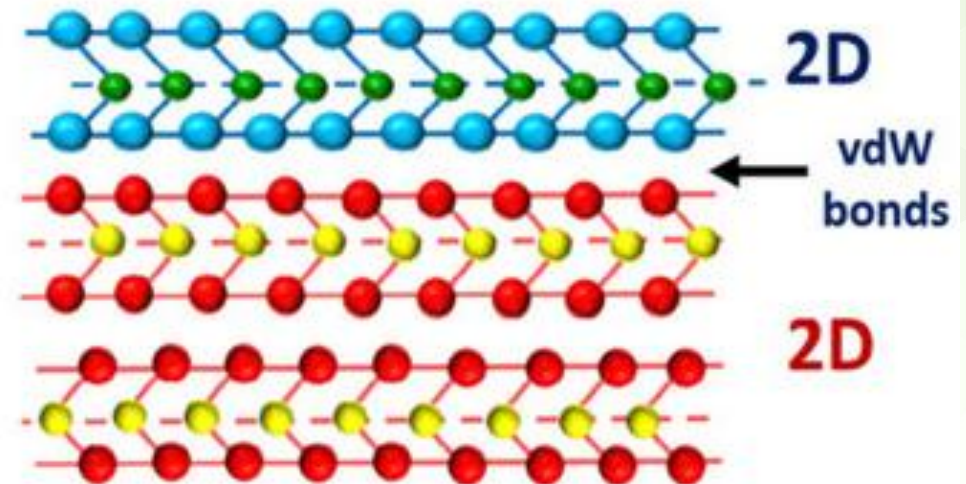
Materialy 3D versus materiały vdW

Silne wiązania we wszystkich 3 wymiarach

– w przypadku materiałów o różnych odległościach między atomami możliwość powstawania defektów

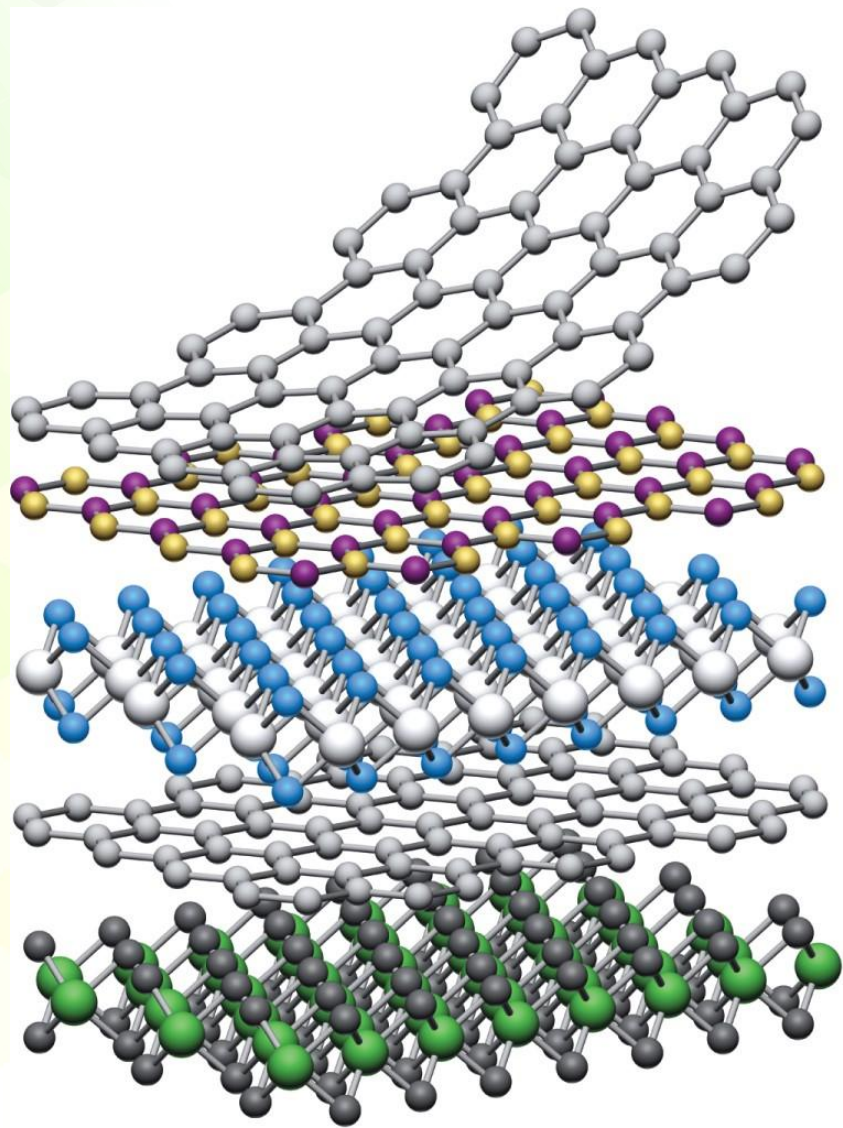


Silne wiązania w płaszczyźnie warstw, słabe między kolejnymi warstwami
– możliwość dowolnego łączenia materiałów

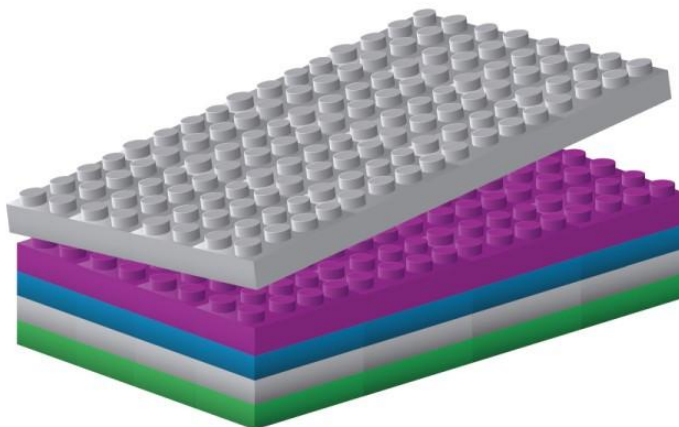


C. Wang et al., Adv. Eng. Mater. 25, adem.202201105 (2022)

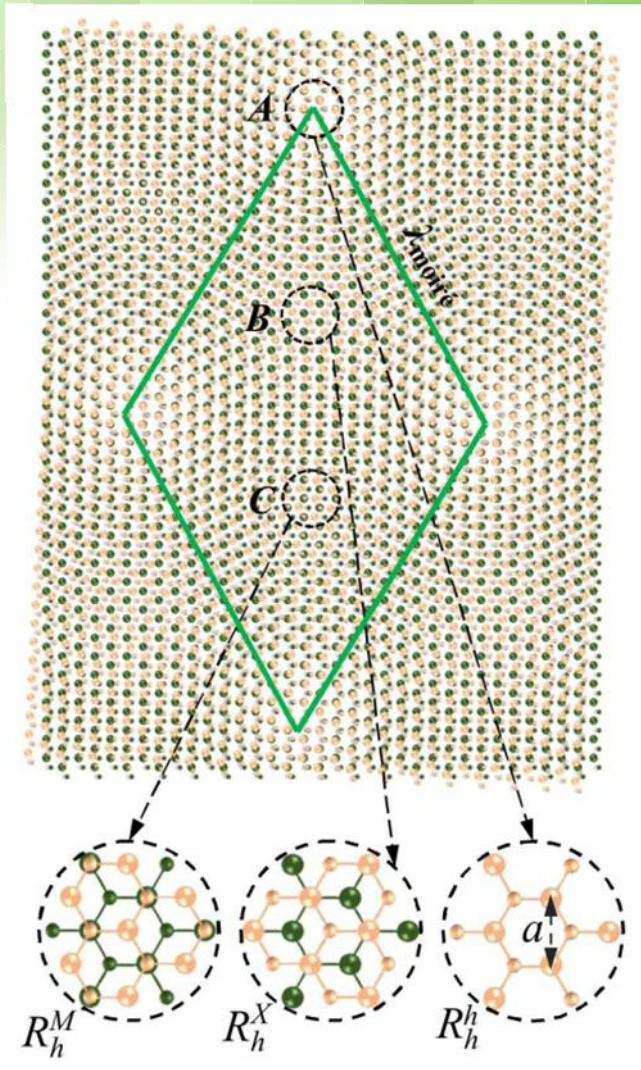
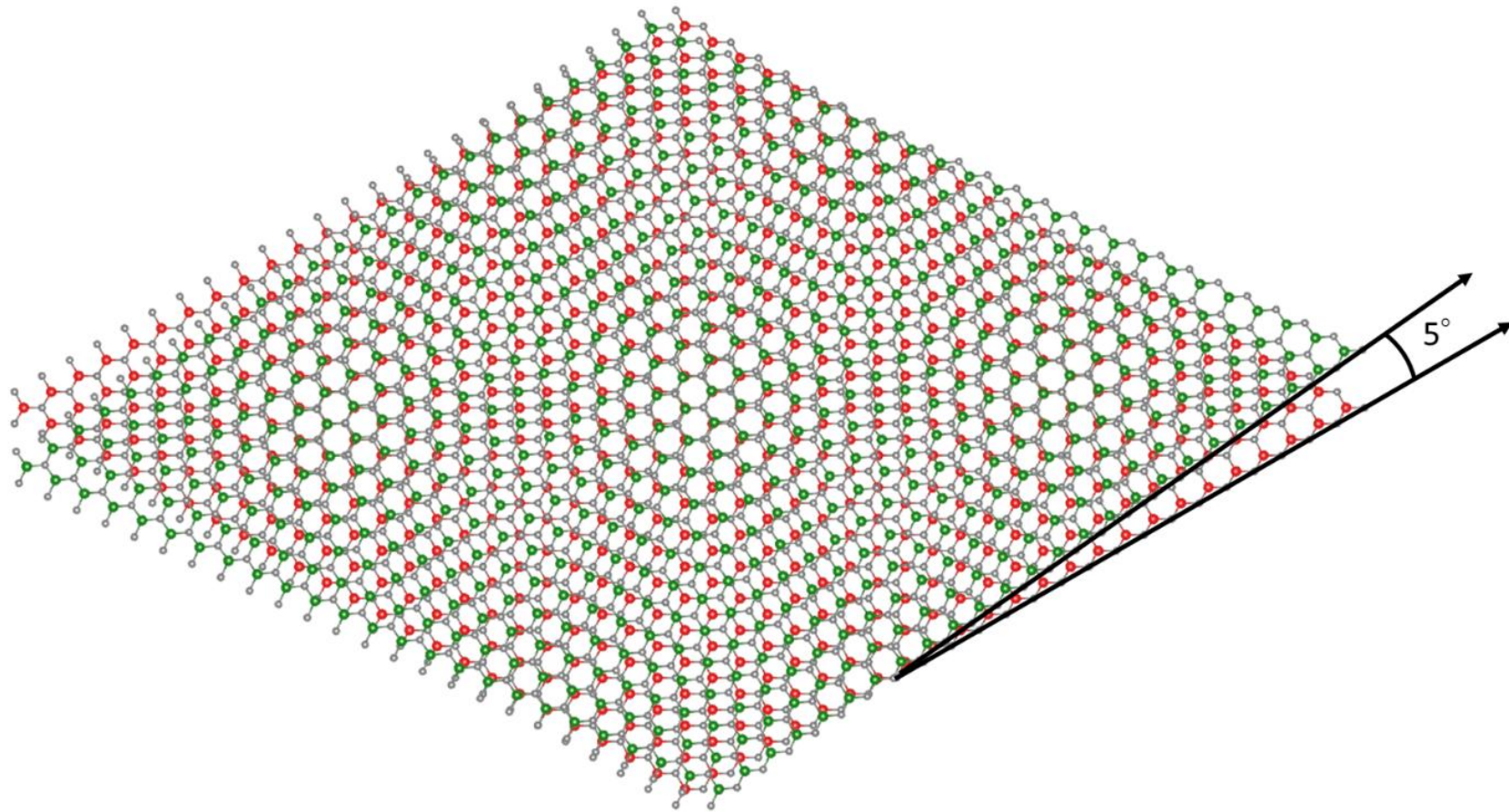
Nano Lego



	Graphene	
	hBN	
	MoS ₂	
	WSe ₂	
	Fluorographene	

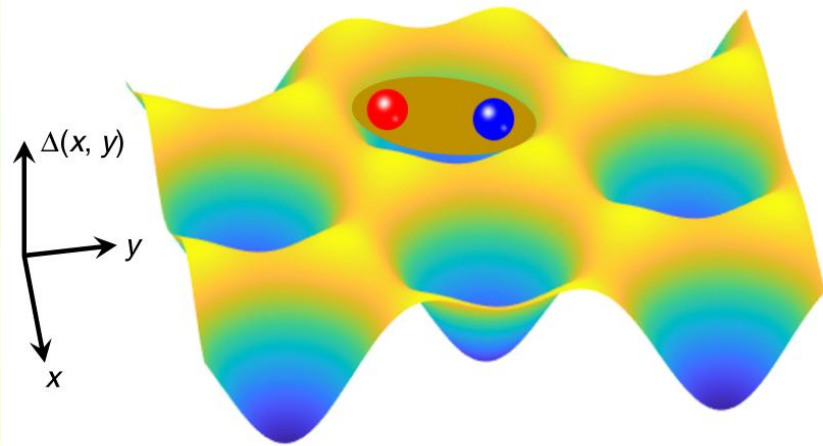


A. Geim et al., Nature 499, 419 (2013)



L. Du, M. R. Molas et al., Science 379, eadg0014 (2023)

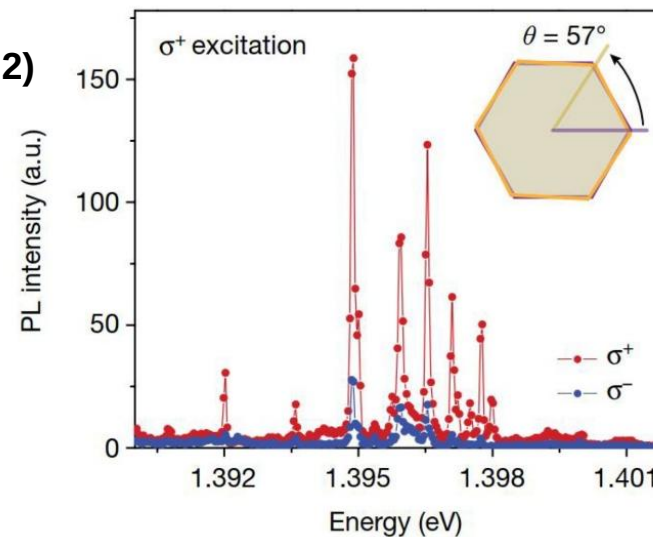
Twistronika – źródła pojedynczych fotonów



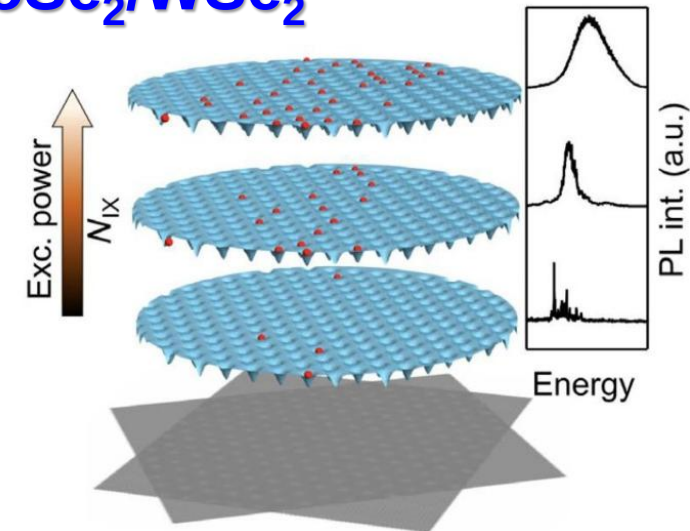
B. Wu et al., Light: Science & Applications 11, 166 (2022)

źródła pojedynczych fotonów – „rodzaj” kropek kwantowych

obniżenie energii układu w określonych punktach sieci moiré – uwięzienie przestrzenne nośników ładunku np. elektronów



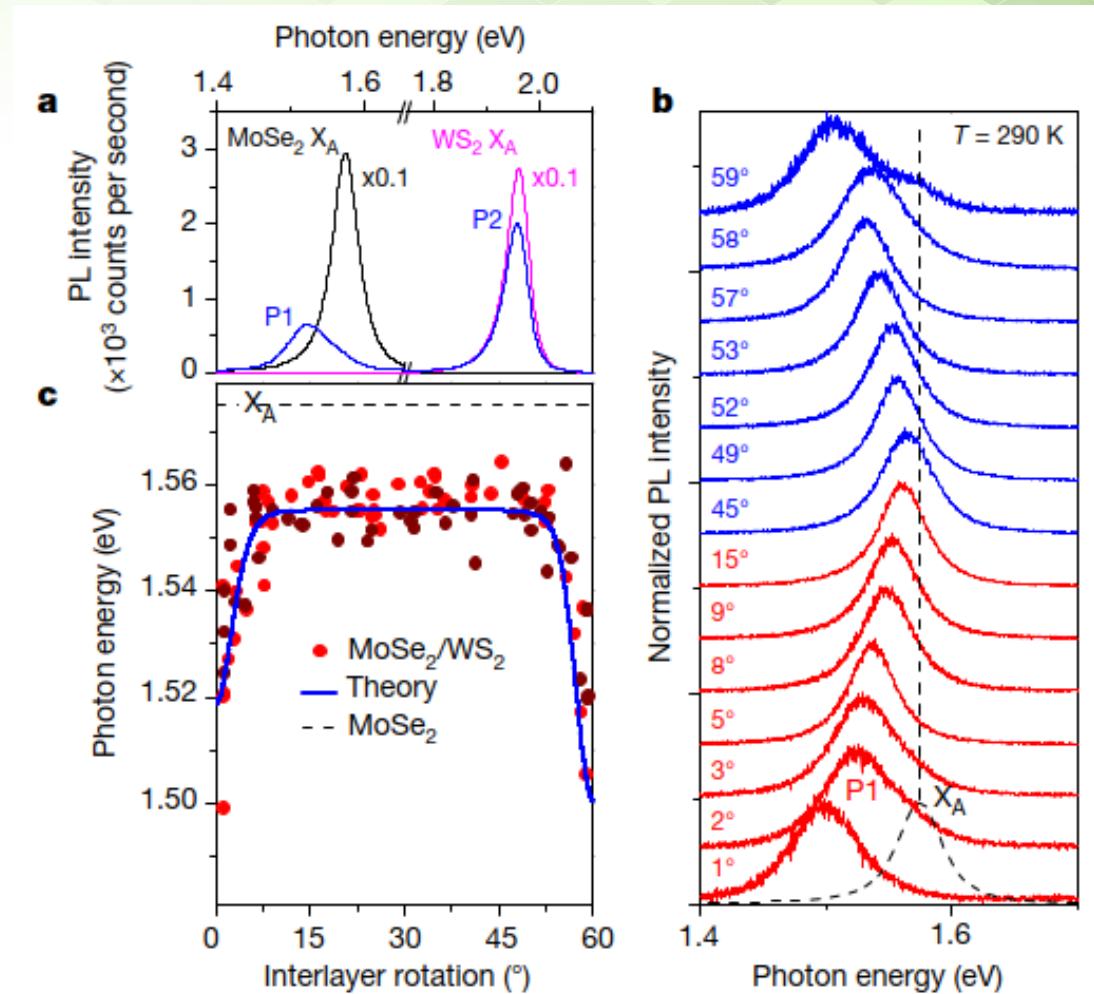
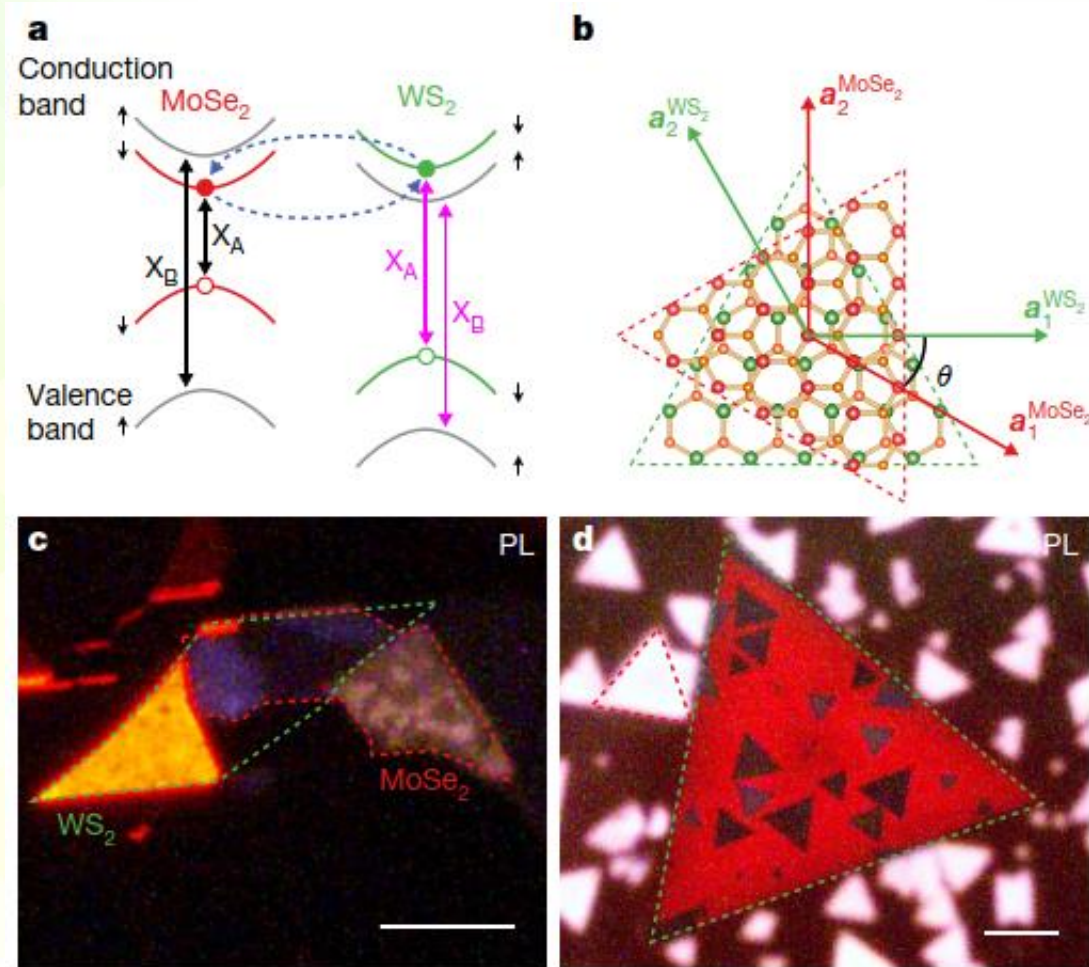
MoSe₂/WSe₂



L. Du, M. R. Molas et al., Science 379, eadg0014 (2023)

Twistronika – stany zhybrydyzowane

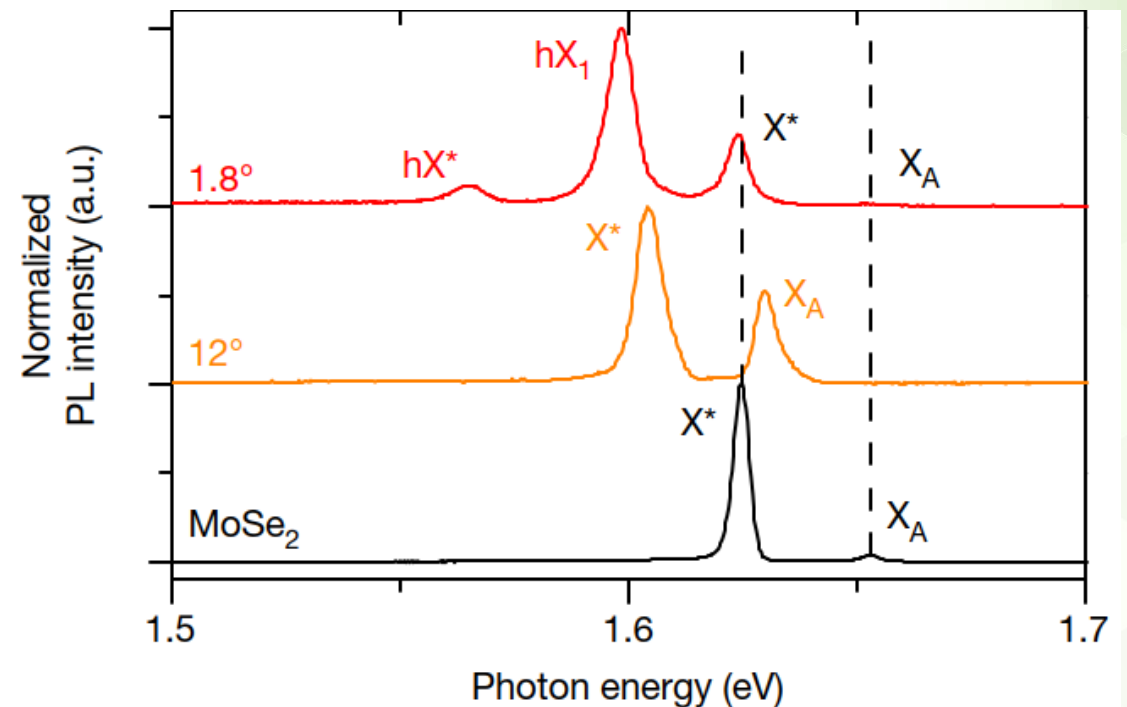
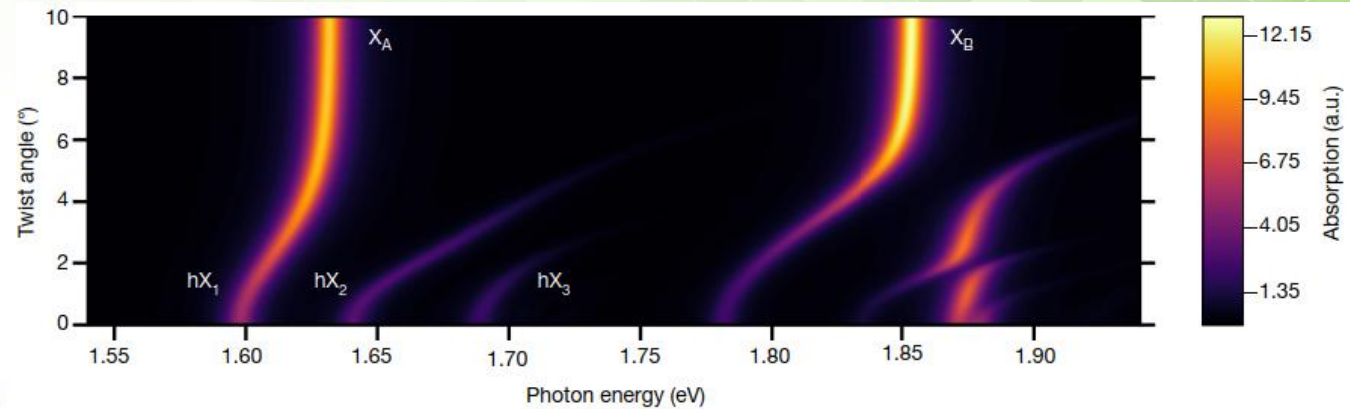
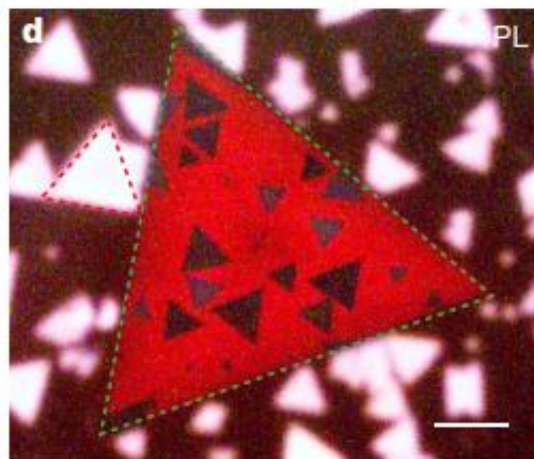
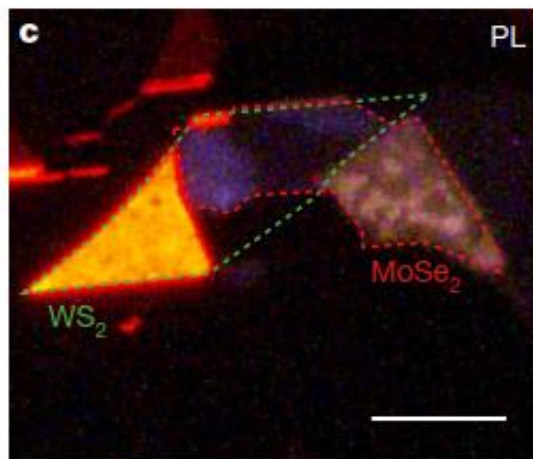
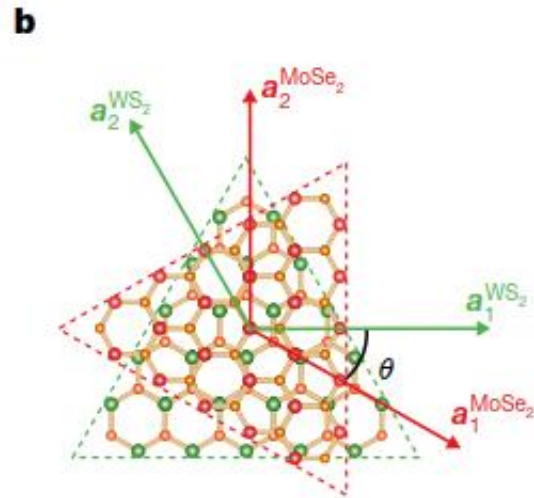
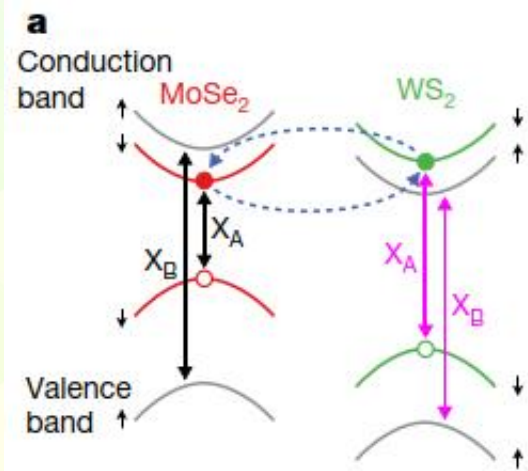
MoSe₂/WS₂



E. M. Alexeev, ..., M. R. Molas et al., Nature 567, 81 (2019)

Twistronika – stany zhybrydyzowane

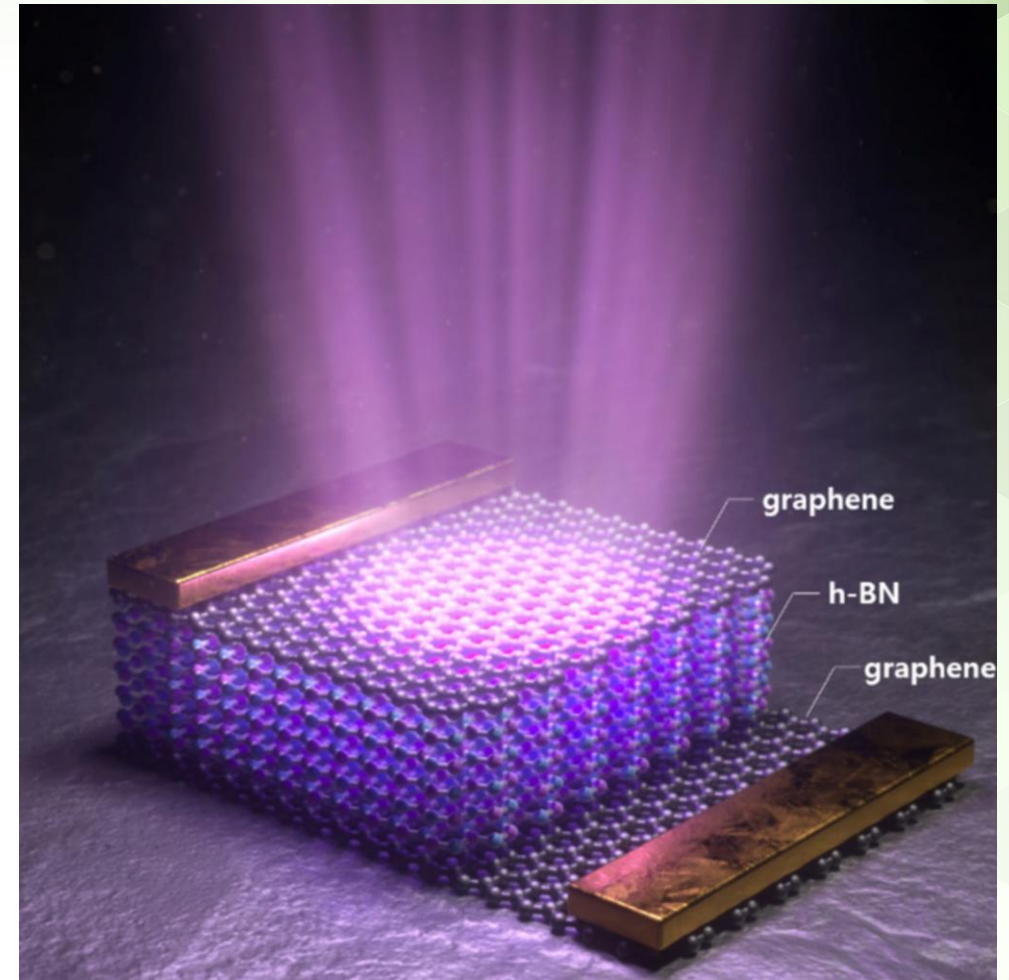
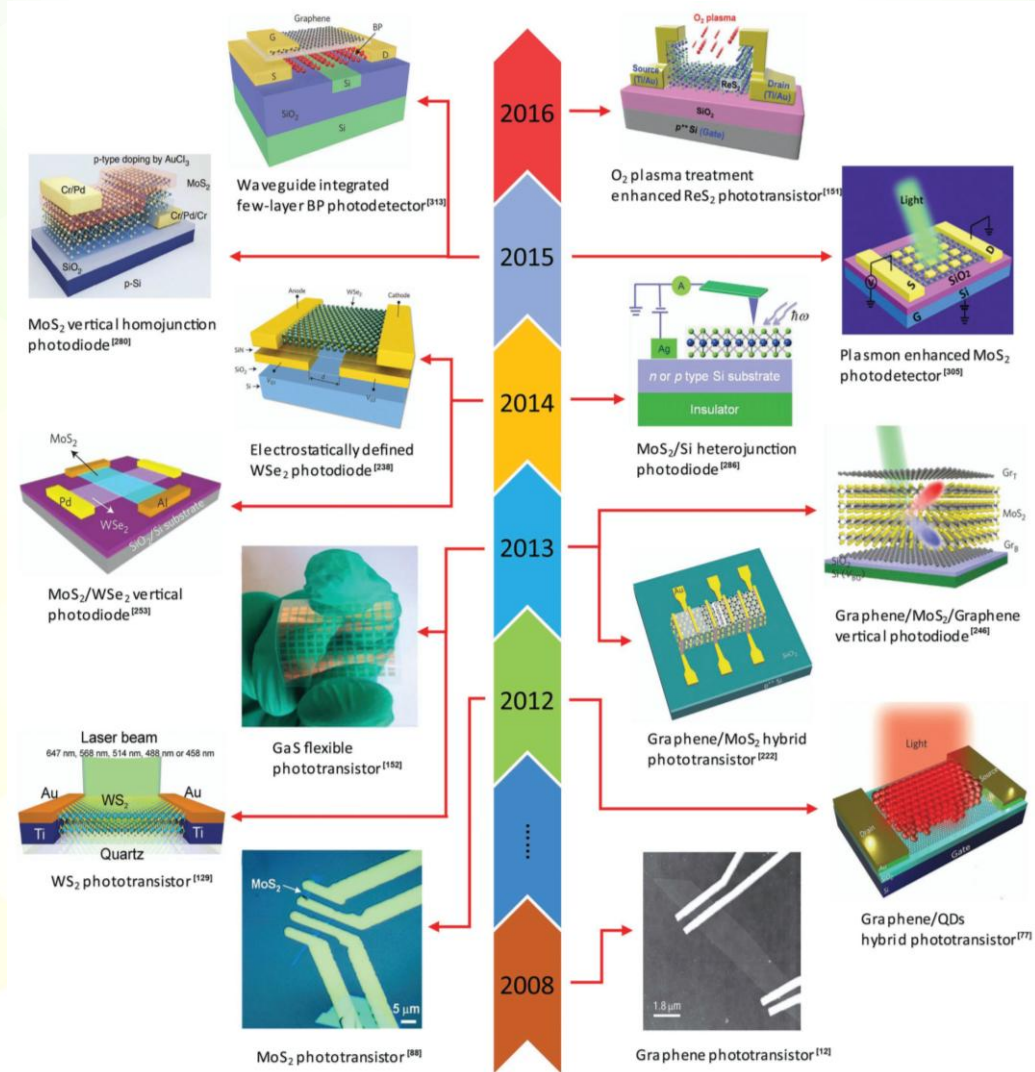
MoSe₂/WS₂



E. M. Alexeev, ..., M. R. Molas et al., Nature 567, 81 (2019)

Potencjalne zastosowania

diody / lasery

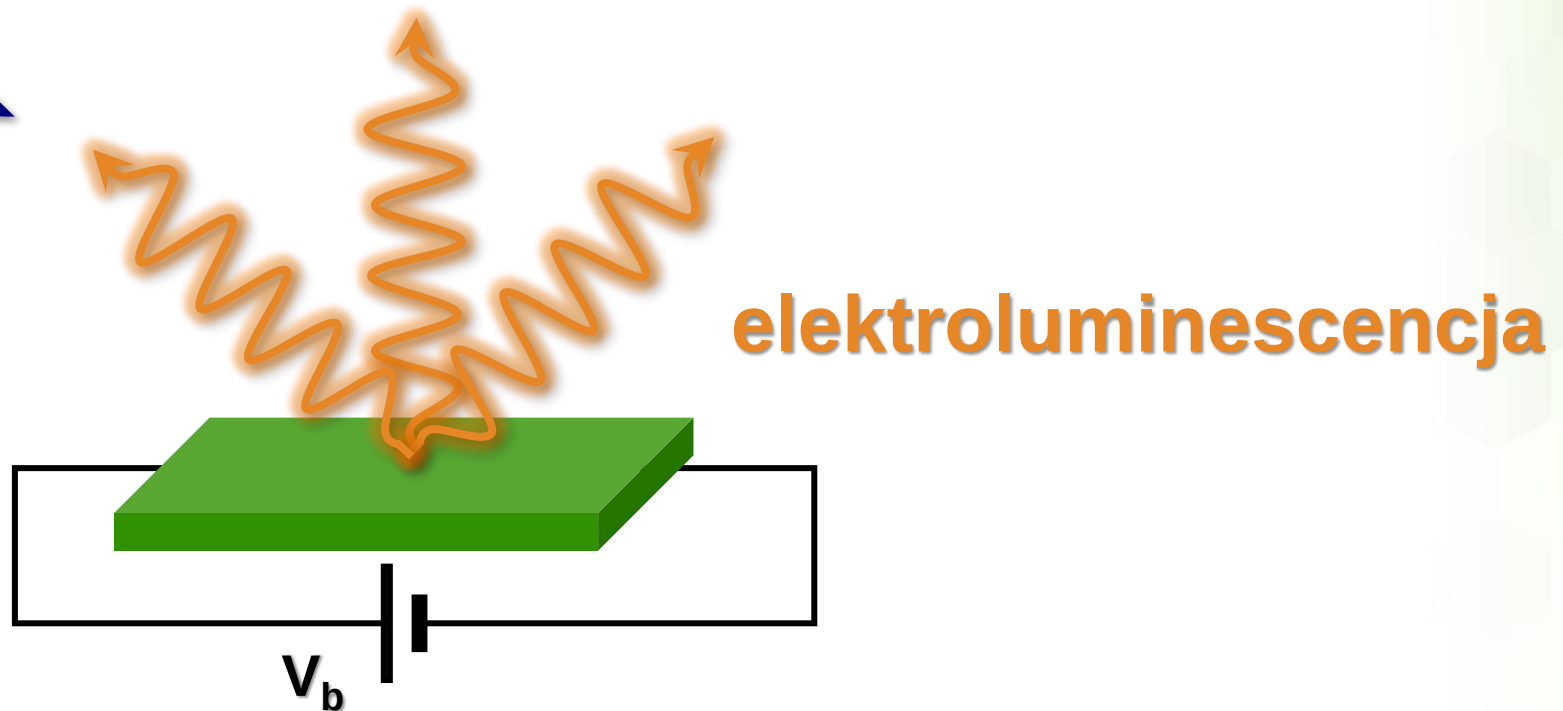
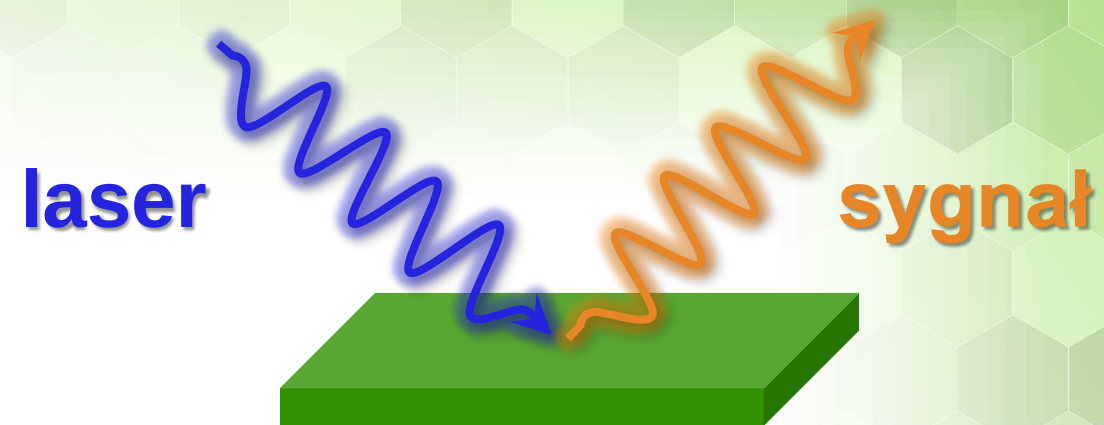


C. Xie et al., Adv. Funct. Mater. 27, 1603886 (2017)

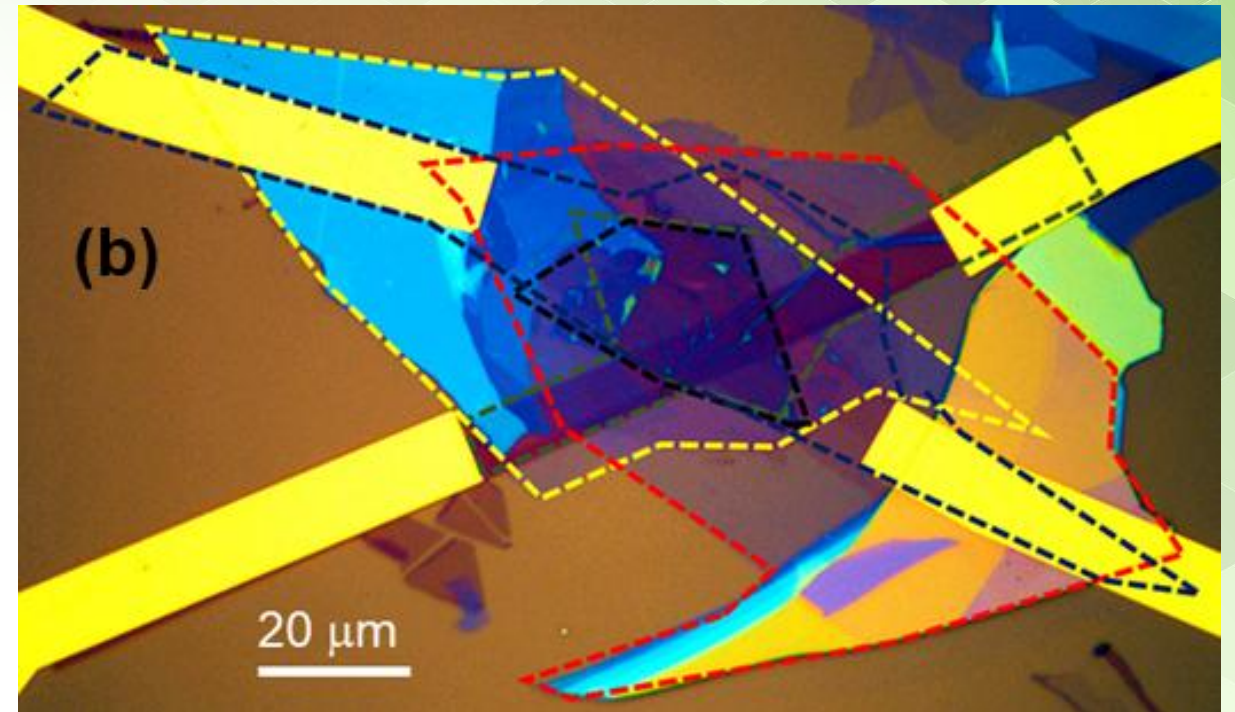
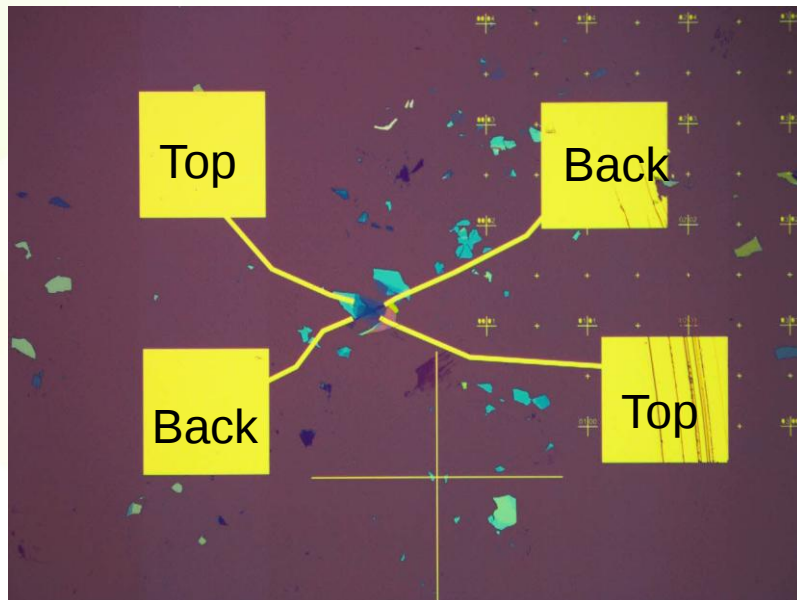
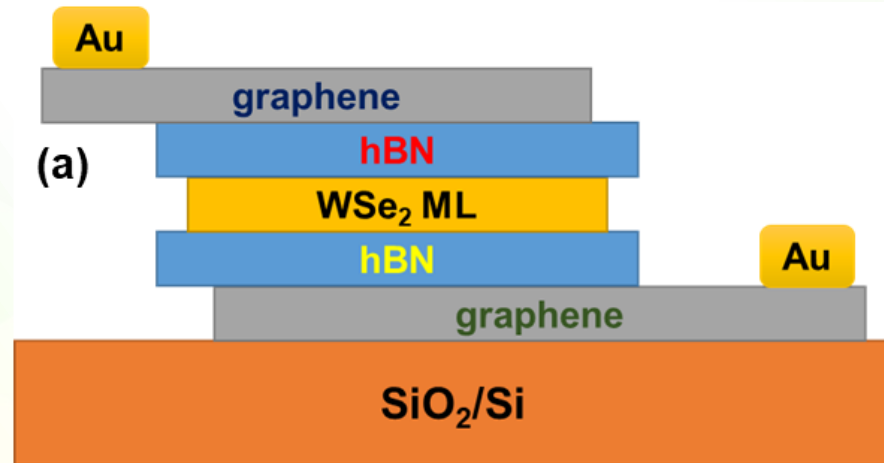
www.sci.news

Techniki eksperymentalne

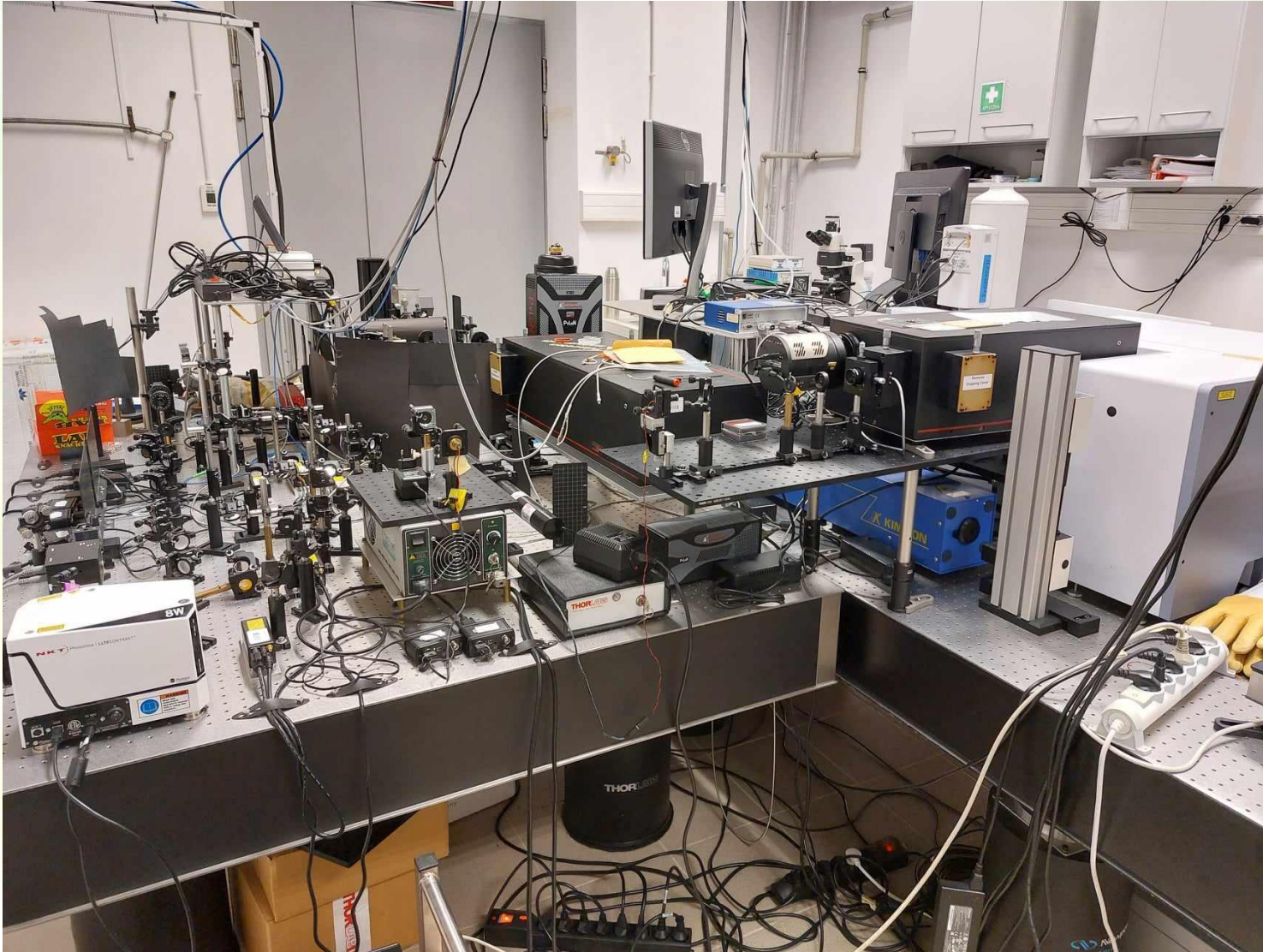
- rozpraszanie ramanowskie
- fotoluminescencja
- pobudzanie fotoluminescencji
- kontrast odbicia
- elektroluminescencja



Elektroluminescencja

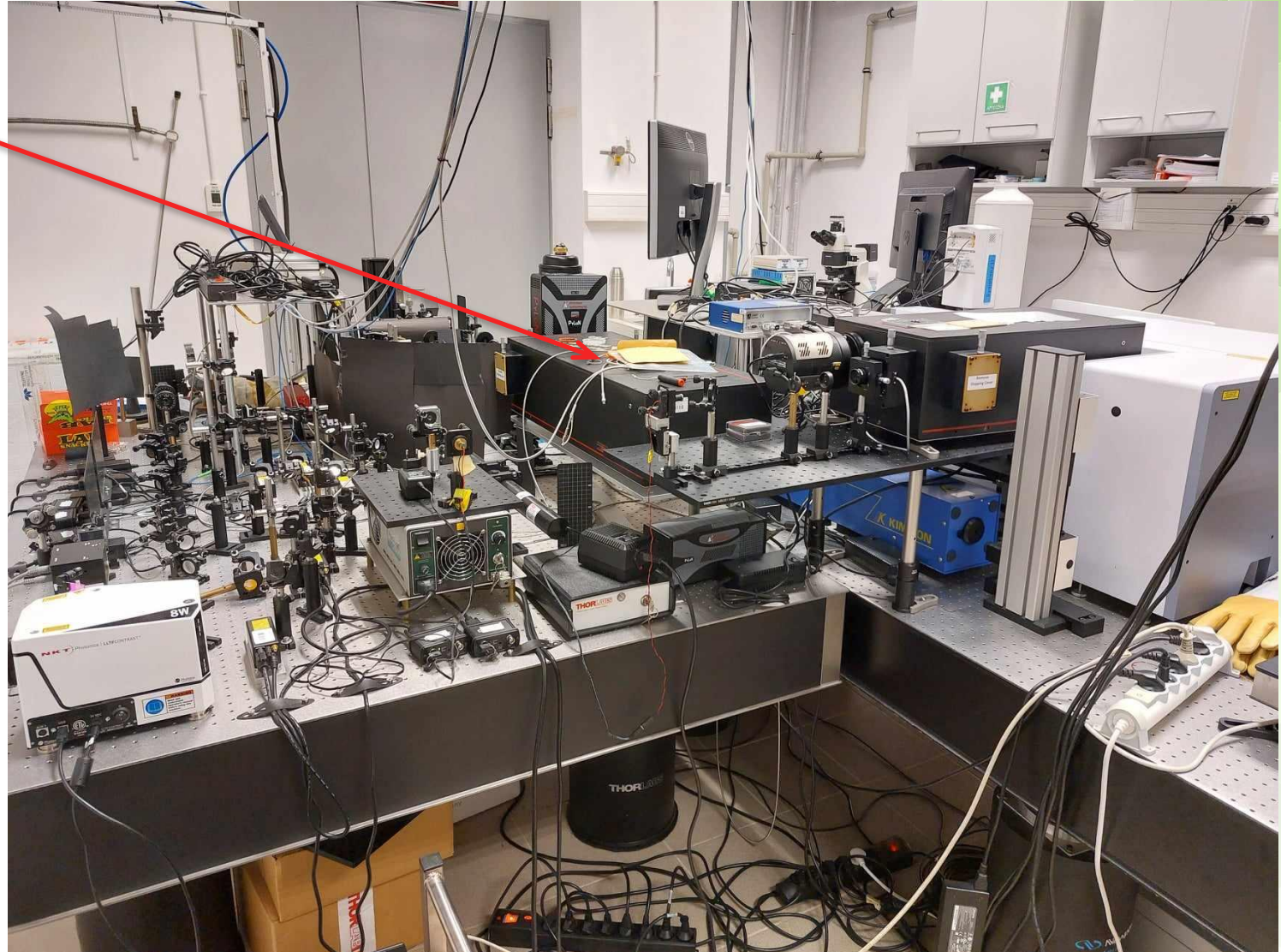


Laboratorium – 3 układy eksperymentalne

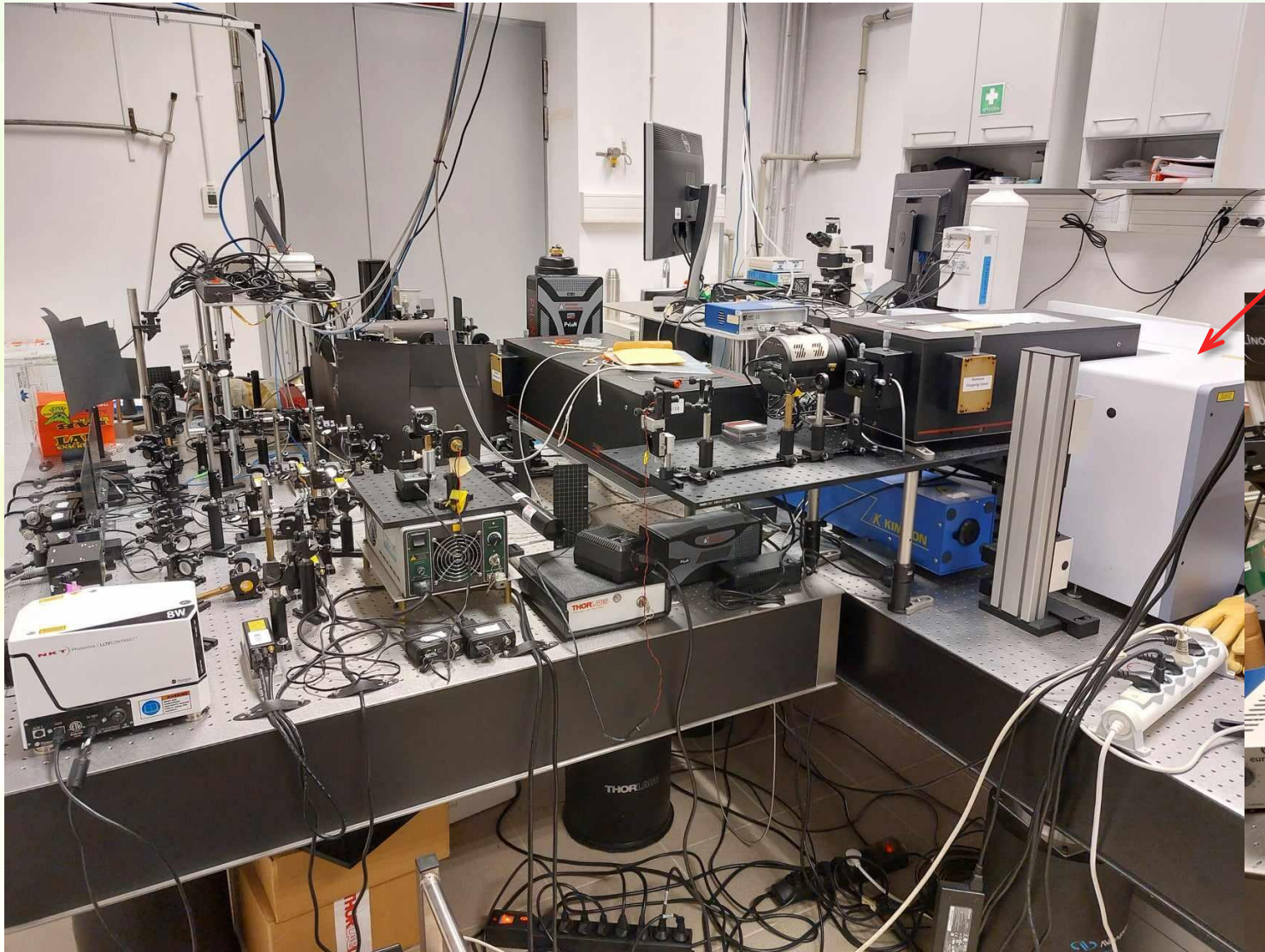


Laboratorium – 3 układy eksperymentalne

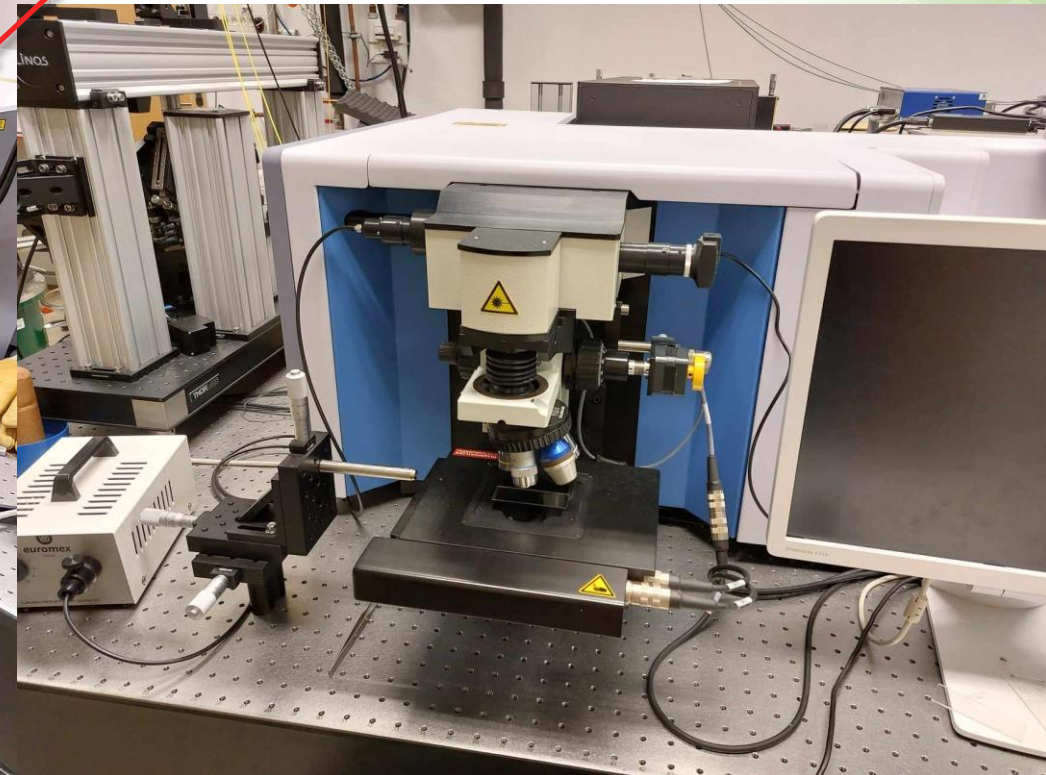
**Spektrometr 1
(75 cm CCD Si)**



Laboratorium – 3 układy eksperymentalne

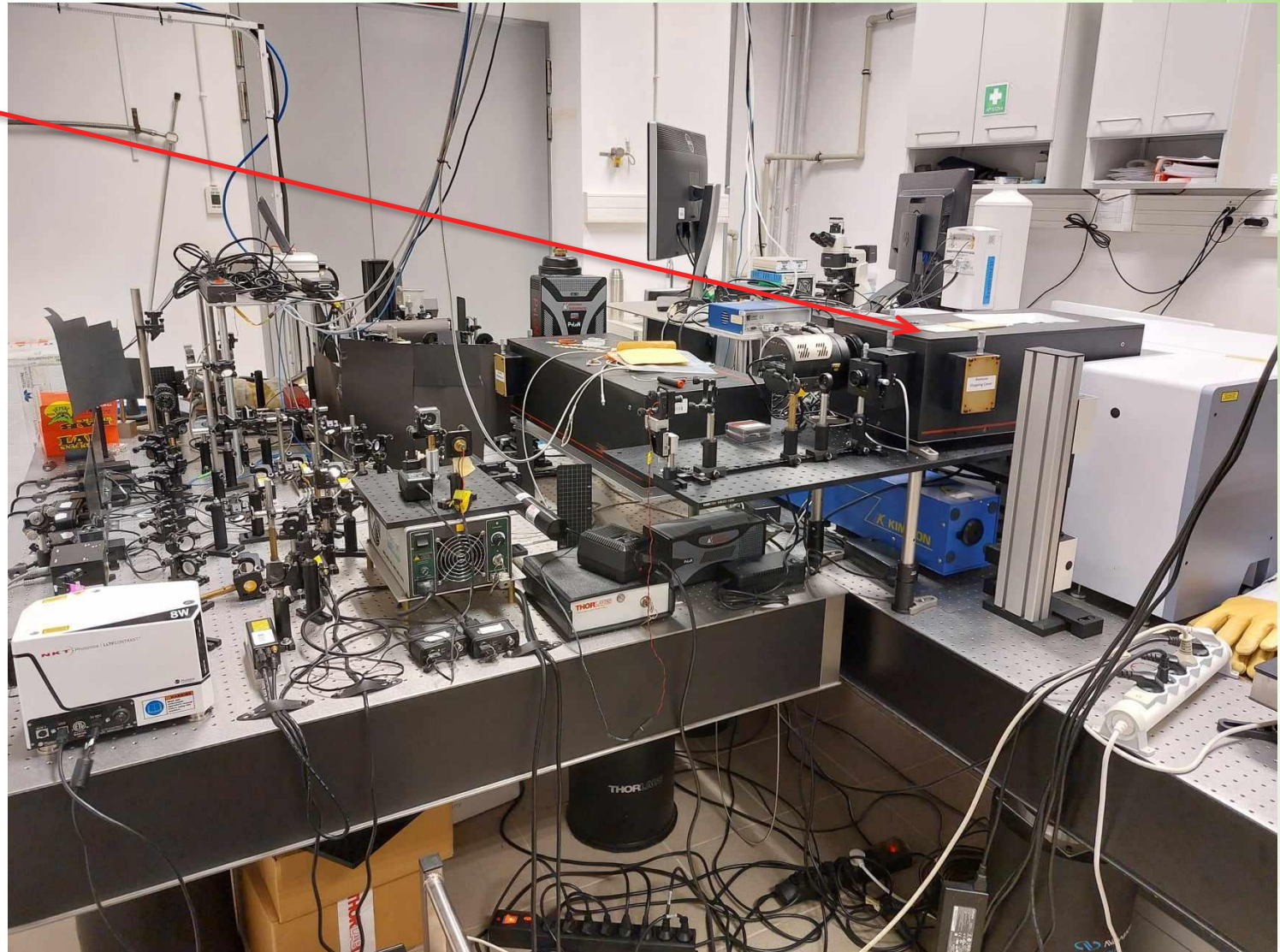


**Spektrometr 2
(CCD Si + InGaAs)**



Laboratorium – 3 układy eksperymentalne

**Spektrometr 3
(50 cm CCD Si)**



Sonda do pomiarów w polu magnetycznym



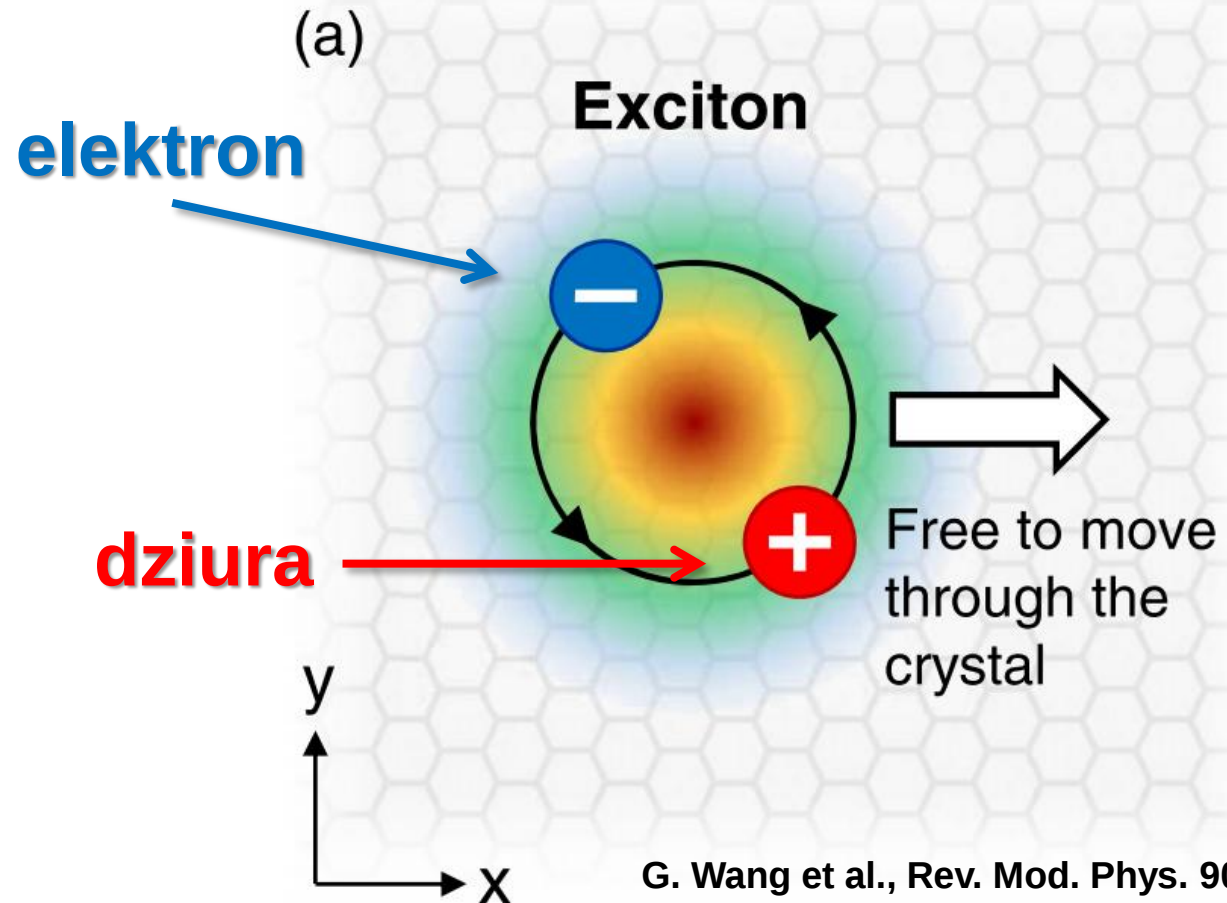
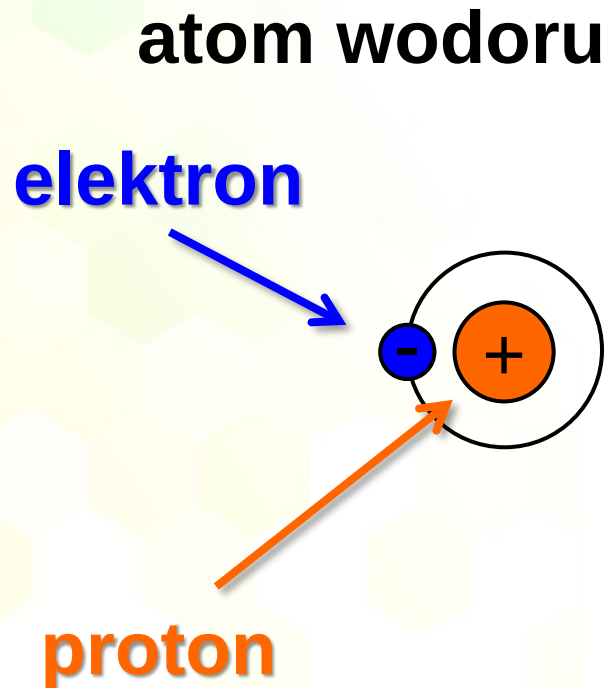
T. Kazimierczuk

Laboratorium przygotowawcze



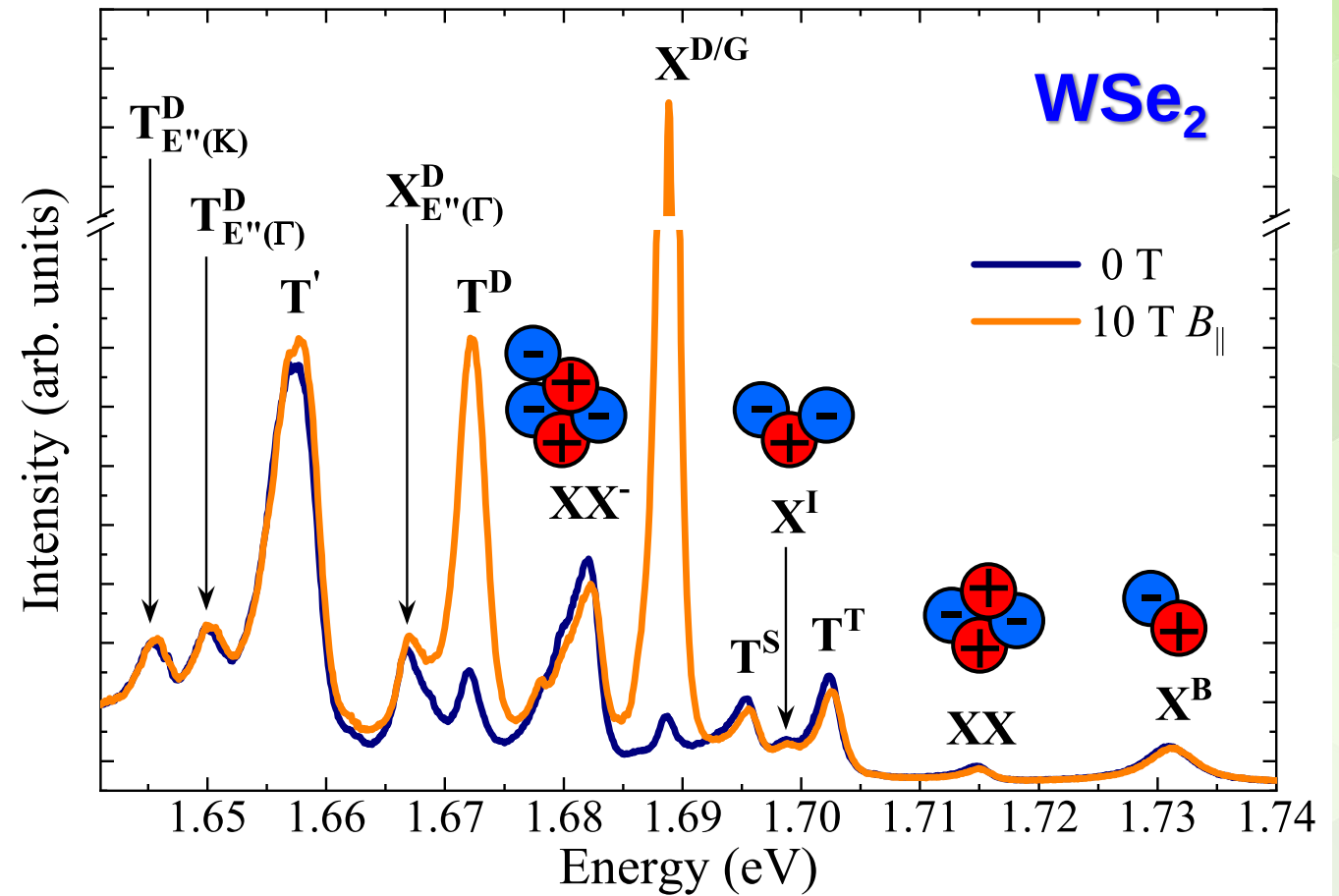
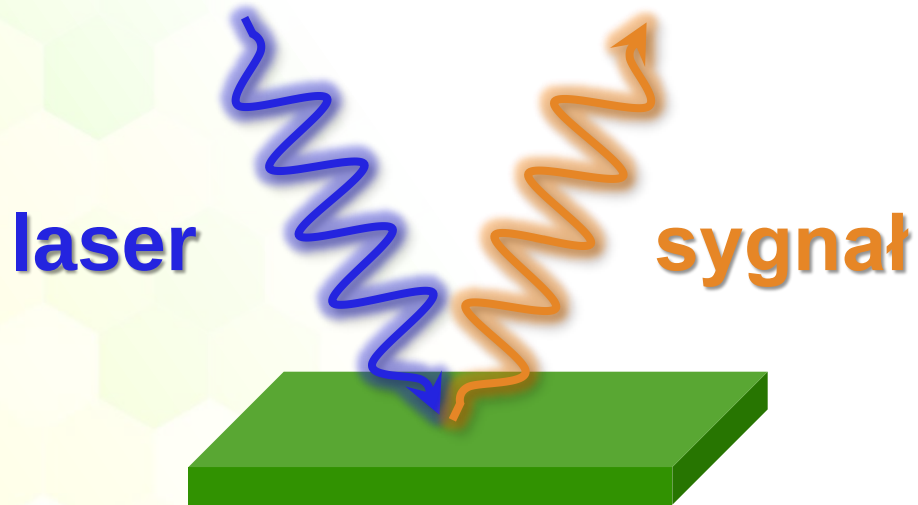
Najważniejsze osiągnięcie naukowe

Badania kompleksów ekscytonowych w cienkich warstwach materiałów warstwowych

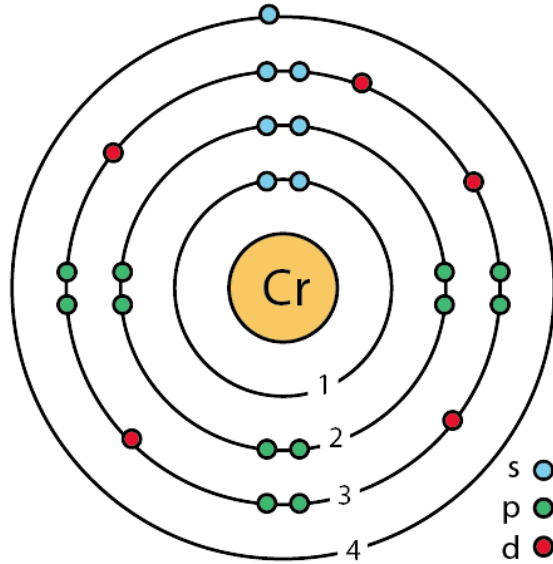


G. Wang et al., Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018)

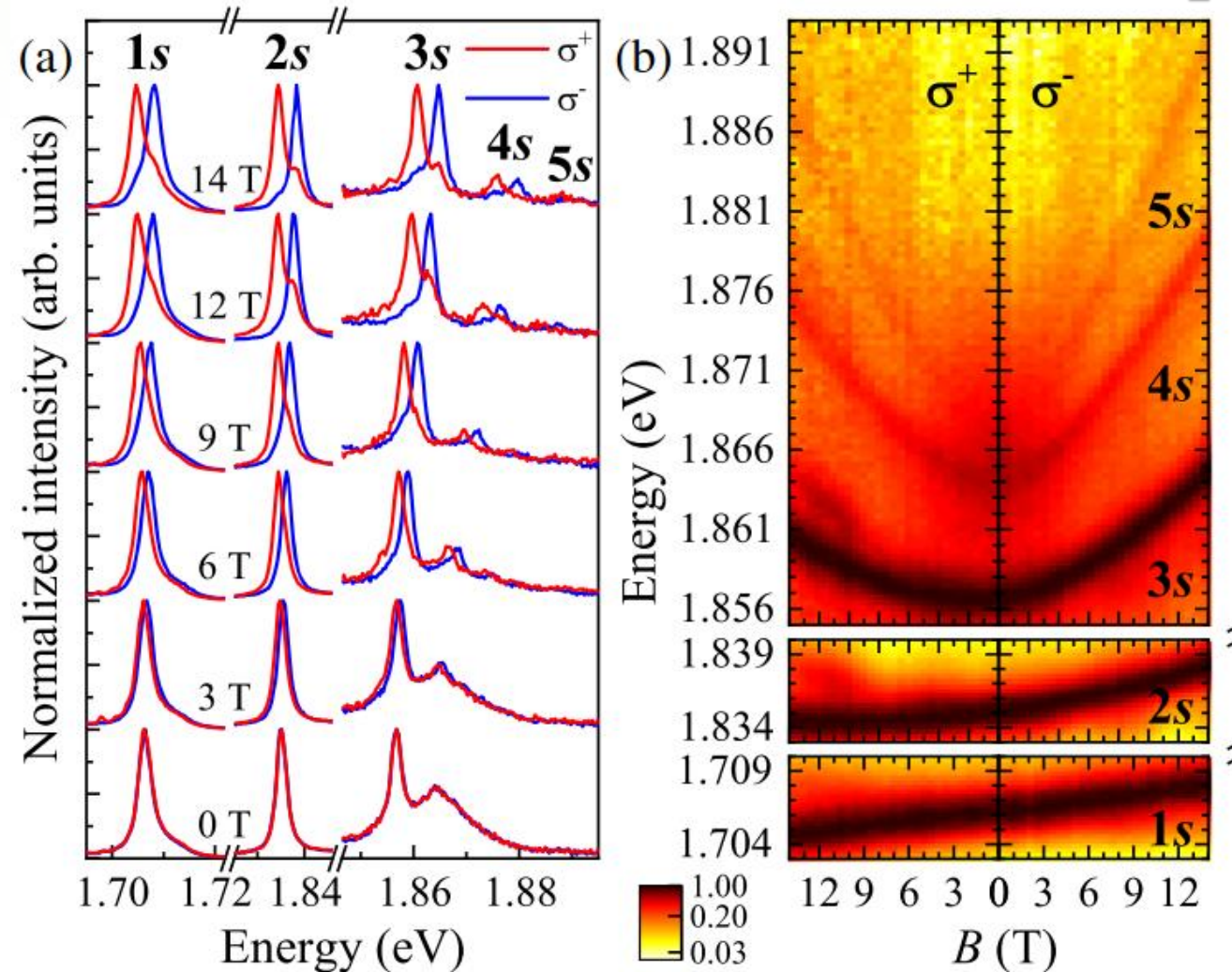
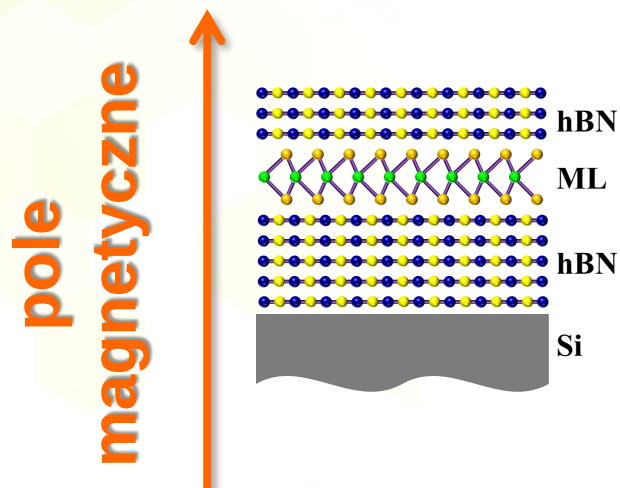
Kompleksy ekscytonowe w monowarstwach



Drabinka stanów ekscytonowych

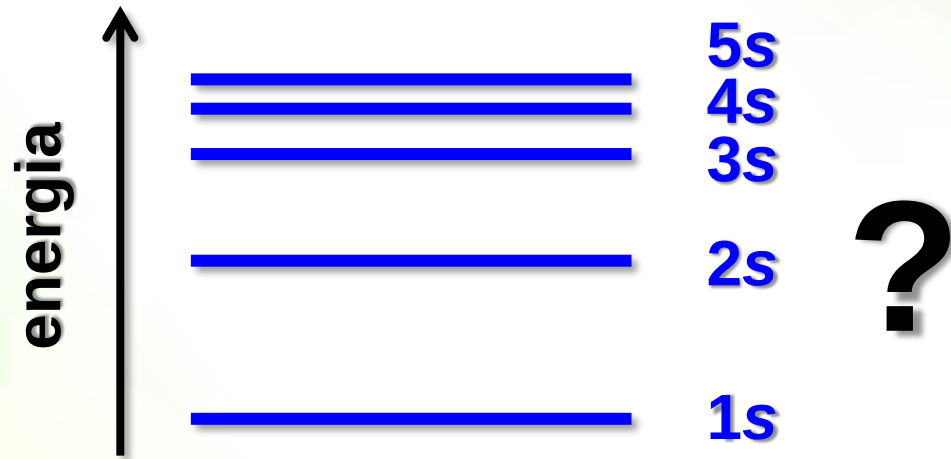
WSe₂

lefteris-kaliambos.fandom.com

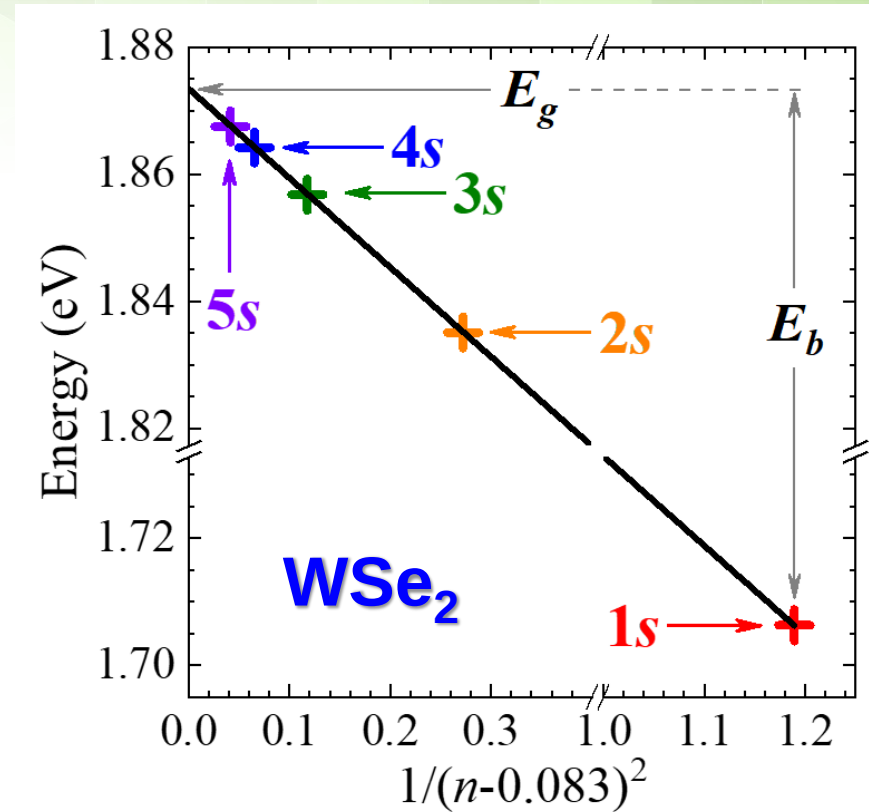


M. R. Molas et al., Physical Review Letters 123, 136801 (2019)

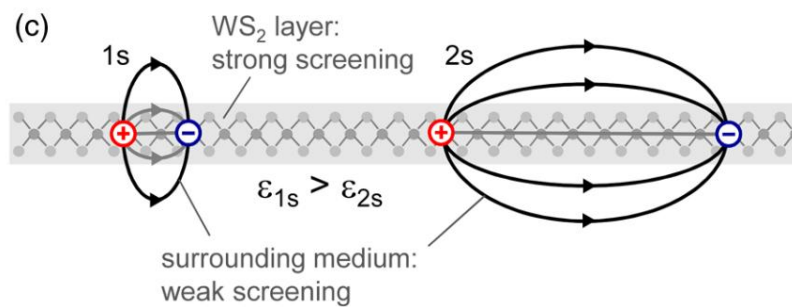
Drabinka stanów ekscytonowych



~~$$E_{ns} \sim 1 / (n - 1/2)^2$$~~



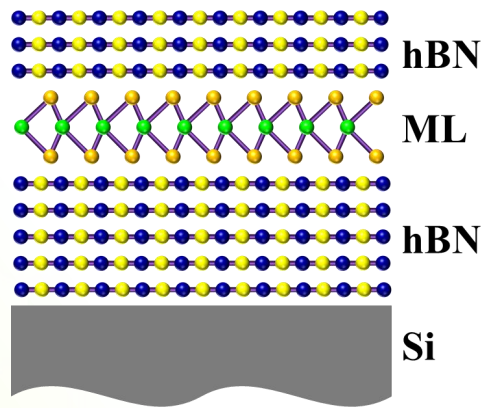
$$E_{ns} \sim 1 / (n + \delta)^2$$



A. Chernikov et al., Physical Review Letters 113, 076802 (2014)

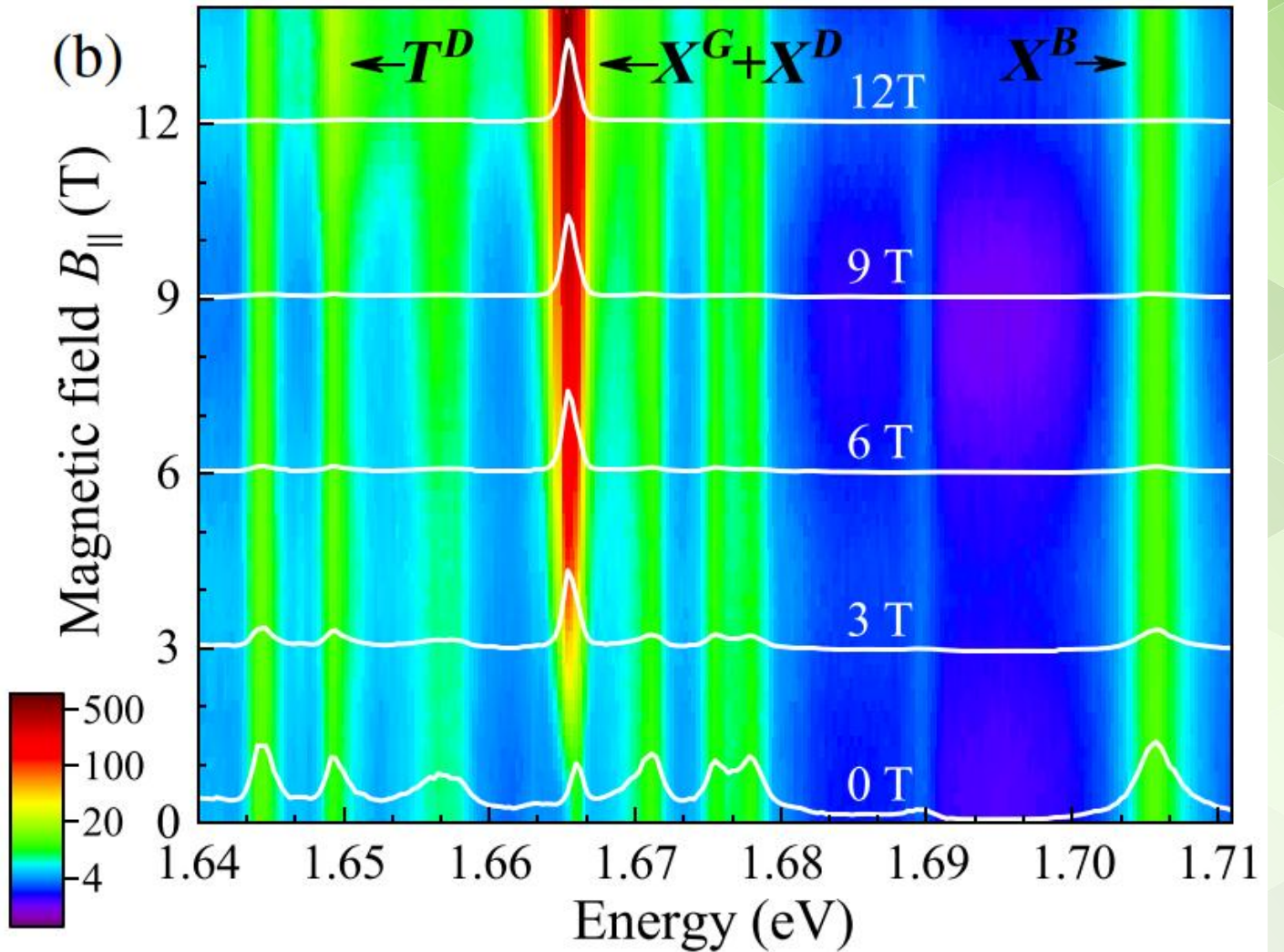
M. R. Molas et al., Physical Review Letters 123, 136801 (2019)

Wpływ pola magnetycznego



**pole
magnetyczne**

**pojaśnianie
ciemnych
ekscytonów**



M. R. Molas et al., Physical Review Letters 123, 096803 (2019)



Ścieżka zawodowa

- **11.2014 – stopień doktora nauk fizycznych**, Uniwersytet Warszawski oraz **stopień doktora** Uniwersytetu w Grenoble, Francja.
- **12.2014 – 10.2017 – staż podoktorski** w Narodowym Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych w Grenoble, Francja.
- **11.2017 – 11.2023 – adiunkt** na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego, Polska.
- **08.2018 – 02.2019 – staż naukowy** na Uniwersytecie Manchesterski, Wielka Brytania.
- **06.2022 – stopień doktora habilitowanego** w dyscyplinie nauki fizyczne.
- **12.2023 – obecnie – profesor uczelni** na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Polska.



Dorobek naukowy

- **Kierownik 8 projektów naukowych**, w tym 7 finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki (m.in. Sonata BIS, 2 x OPUS).
- **Współautor 95 artykułów naukowych** opublikowanych w latach 2009 - 2024 w renomowanych czasopismach (m. in. Nature, Science, Nano Letters), które były **cytowane przeszło 3000 razy** (bez autocytowań).
- **Stypendium dla wybitnych młodych naukowców** Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (2018 – 2021).
- **Szereg nagród naukowych** (Rektora UW (4x), Dziekana Wydziału Fizyki UW, czasopisma 2D Materials).
- **22 wygłoszone referaty** na międzynarodowych konferencjach naukowych od 2016 roku, w tym 12 zaproszonych.



Grupa badawcza



M. Molas



A. Babiński



A. Karmakar

postdok



I. Antoniazzi

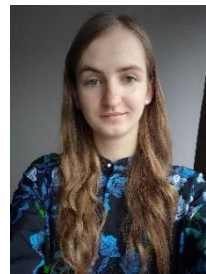
doktorantki / doktoranci



K. Olkowska-Pucko



Ł. Kipczak



N. Zawadzka

studenci



K. Walczyk



Gayatri



G. Krasucki



C. Mohanty



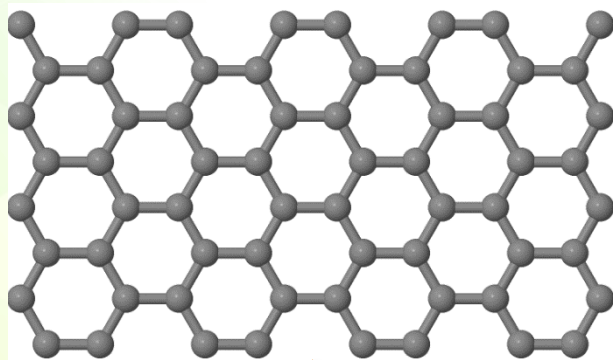
S. Socha



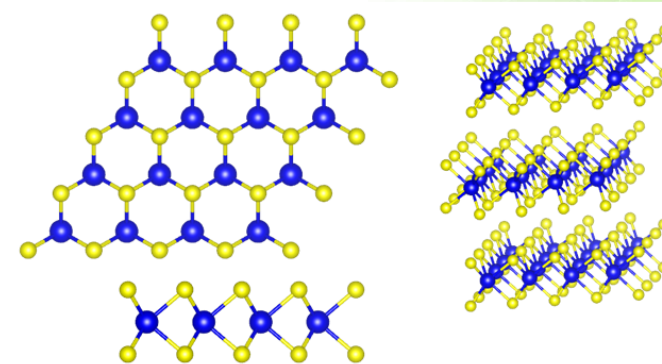
J. Sójka

Materialy warstwowe van der Waalsa

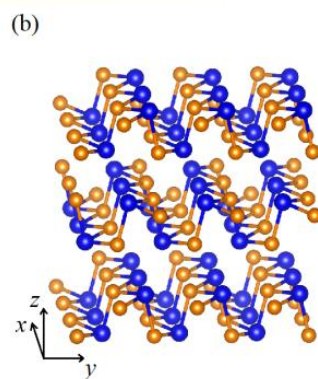
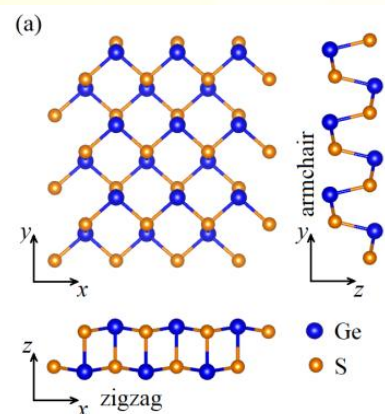
grafen



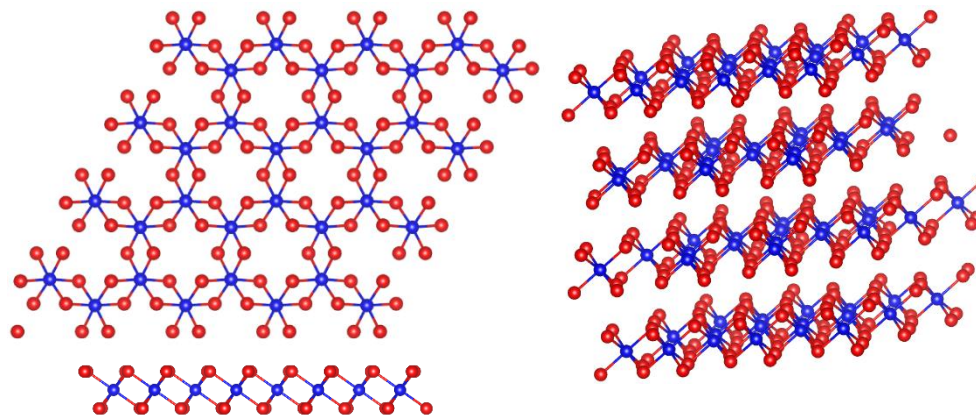
dichalkogenki metali przejściowych MX_2
 MoS_2 , WSe_2 , MoTe_2 , ...



monochalkogenki metali MX
 GeS , SnS , ...



trihalogenki chromu CrX_3
 CrBr_3 , CrCl_3 , CrI_3



właściwości
magnetyczne

Projekty badawcze

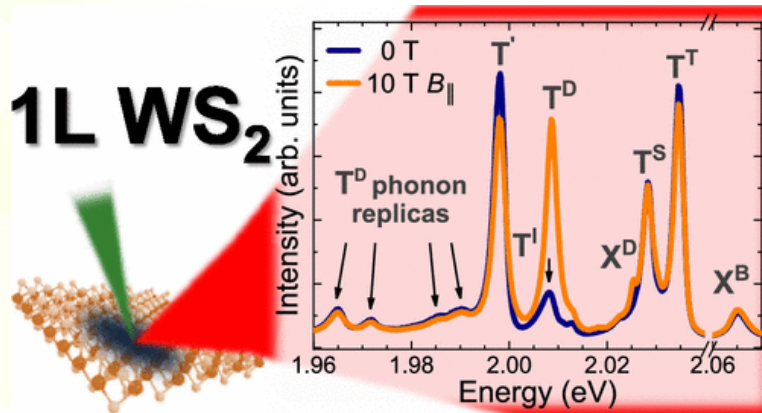


N A R O D O W E C E N T R U M N A U K I

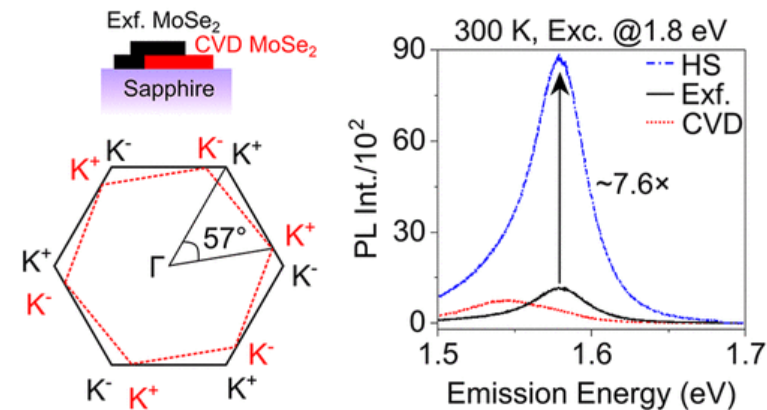
- *Hybrydowe struktury materiałów warstwowych dla nowoczesnej optoelektroniki*
SONATA BIS (M. Molas)
- *Zjawiska magnetyczne na równinach: Badania atomowo-cienkich warstw magnetycznych*
OPUS (M. Molas)
 - *Magnetyczne materiały warstwowe w warunkach ekstremalnych*
PRELUDIUM BIS (M. Molas)
 - *Transport energii w dwuwymiarowych heterostrukturach warstwowych*
SONATA (A. Karmakar)
 - *Fale gęstości ładunku w materiałach van der Waalsa*
PRELUDIUM (N. Zawadzka)
- *Właściwości optyczne monowarstw stopów dichalkogenów metali przejściowych*
PRELUDIUM (K. Olkowska-Pucko)

Publikacje naukowe

- **2018 – 2024 – 66 opublikowanych** artykułów naukowych w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym,
 - ✓ w takich czasopismach jak: **Nature (1), Science (1), Nature Communications (3), Advanced Functional Materials (1), Nano Letters (3), Advanced Optical Materials (2), Physical Review Letters (3), Nanoscale (6), 2D Materials (6).**
 - ✓ **ponad 30 publikacji stanowią badania własne grupy LaSsO**



M. Zinkiewicz et al., Nano Letters 21, 2519 (2021)



A. Karmakar et al., Nano Letters 24, 9459 (2024)



Współpraca naukowa



M. Koperski
K. Novoselov



Z. Kudrynskiy
A. Patane



T. Taniguchi



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

A. Polimeni



A. Al-Mahboob



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

Z. Muhammad



UNIVERSITÄT
LEIPZIG

H. Kohlmann



C. Faugeras



CHARLES
UNIVERSITY
IN PRAGUE

A. Slobodeniuk



The University of Manchester

R. Gorbachev

Podziękowania



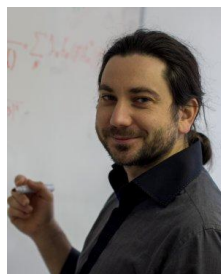
prof. M. Potemski



prof. A. Babiński



dr K. Nogajewski



dr A. Slobodeniuk



I. Breslavetz



dr hab. J. Binder

dr hab. T. Kazimierczuk
dr T. Woźniak
dr M. Koperski
dr M. Grzeszczyk
dr M. Zinkiewicz
i ...



Plany naukowe

- stworzenie **grupy badawczej o ugruntowanej pozycji naukowej** zajmującej się

wytwarzaniem wysokiej jakości próbek składających się

materiałów warstwowych van der Waalsa

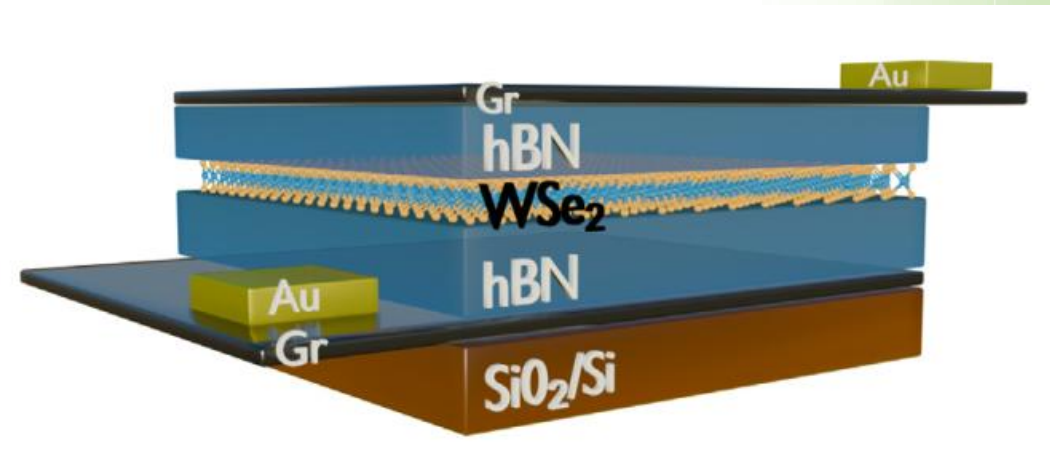
oraz

badaniami ich

właściwości elektronowych,

wibracyjnych,

optycznych oraz magnetycznych



K. Walczyk et al., Sol. Stat. Comm. 396, 115756 (2025)

Dziękuję bardzo za uwagę 😊



14.04.2025