



Institut za fiziku



Optička svojstva jednoslojnog i dvoslojnog MoS₂

Valentino Jadriško

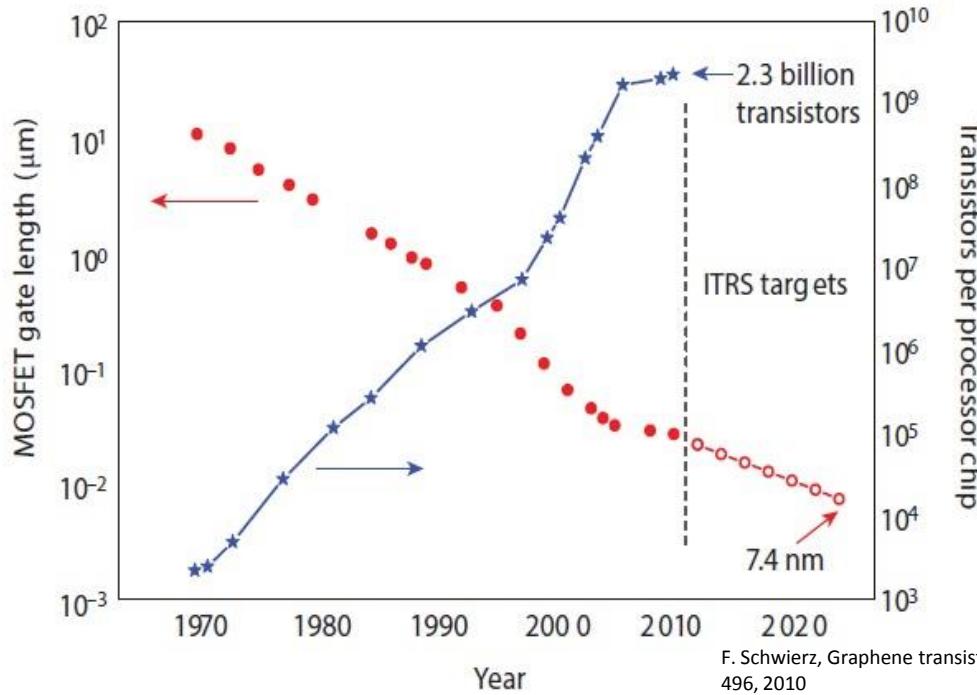
Mentor: Nataša Vujičić, IFS

Siječanj 2017

Sadržaj

- Motivacija
- 2D i TMD materijali
- MoS₂
- Eksperimentalni postav
- Rezultati
- Sažetak

Motivacija

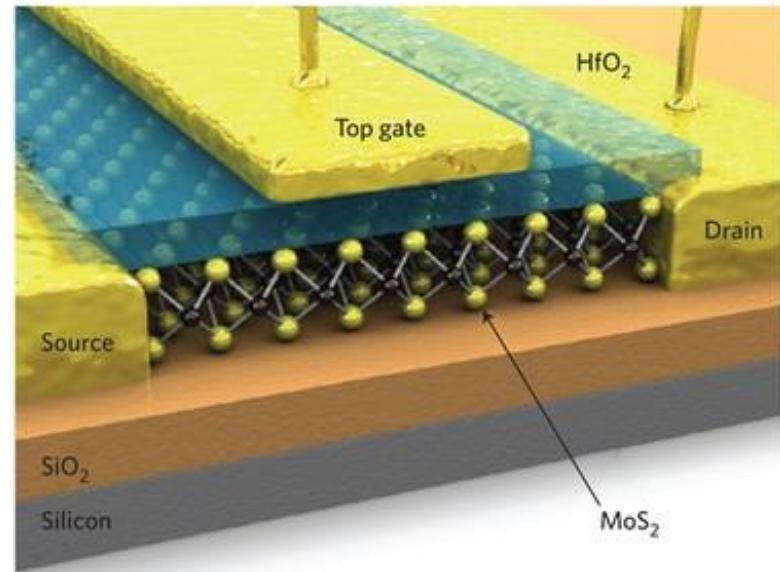


F. Schwierz, Graphene transistors, Nature Nanotechnology, vol. 5, no. 7, pp. 487-496, 2010



Motivacija

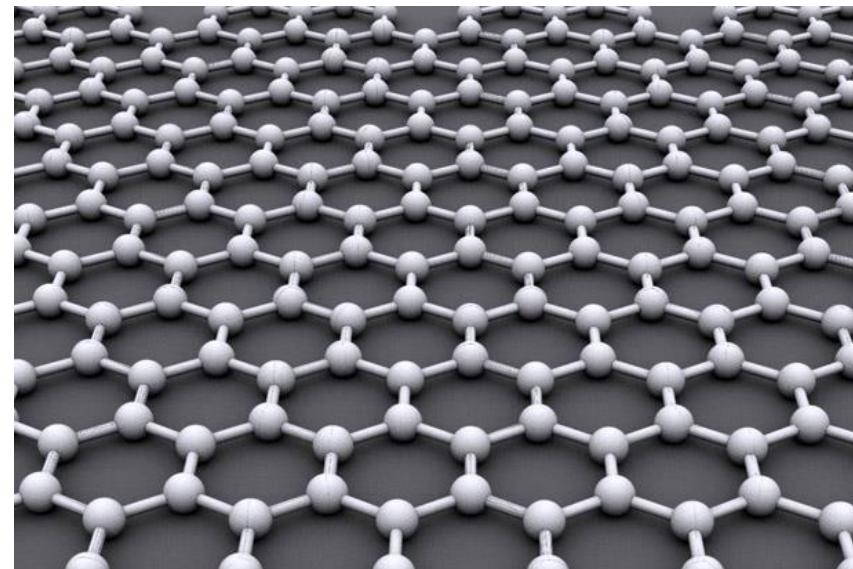
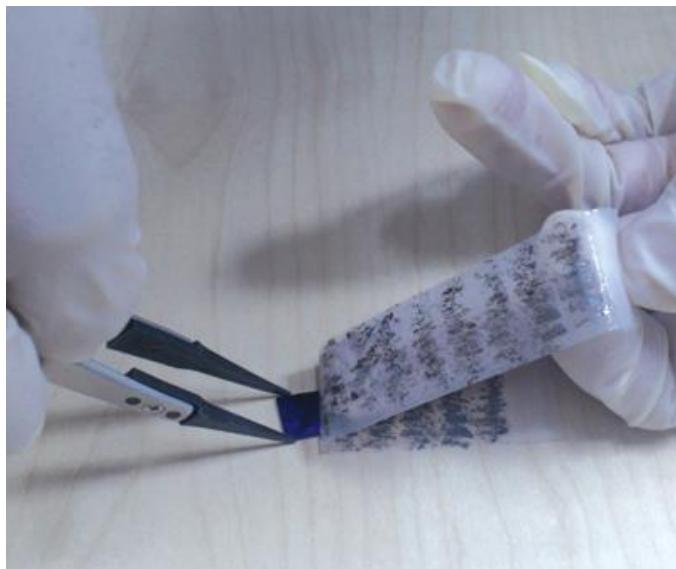
- Problemi u tranzistorskoj tehnologiji:
 - Smanjivanje proizvodnih procesa
 - Gubitak energije kroz toplinu
- Potreban on/off omjer struje:
 - Za stolna računala 10^4
 - Za mobitele i tablete 10^6
- Prirodna duljina
$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_{ch}}{\varepsilon_{ox}} d_{ox} d_{ch}}$$
- $L \geq 3\lambda$



2D materijali

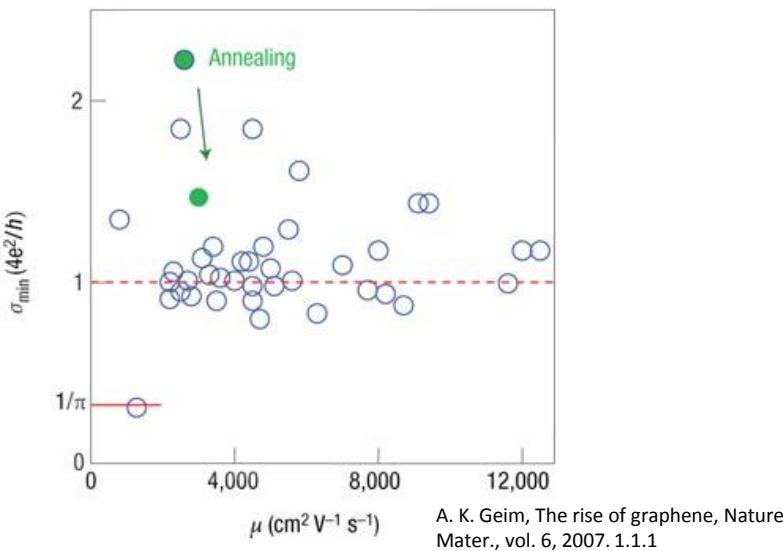
Grafen:

- Prvi 2D materijal
- Dobiven eksfolijacijom iz grafta

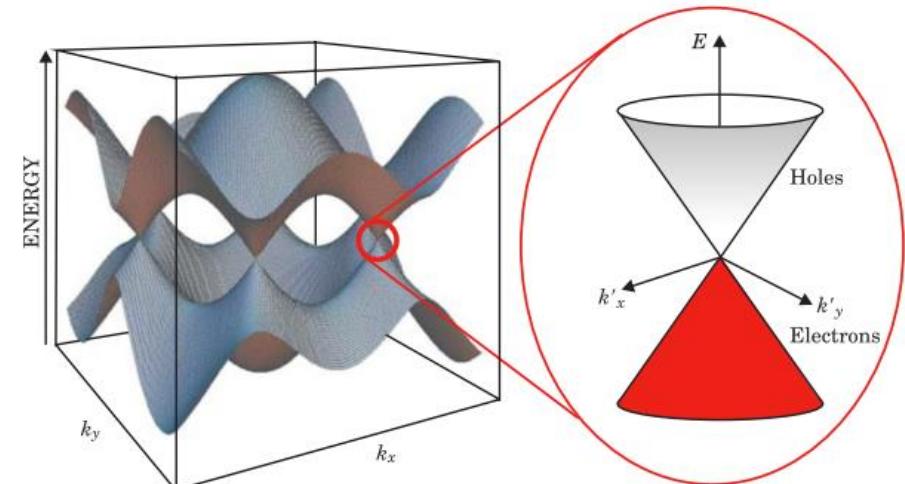


Grafen- svojstva

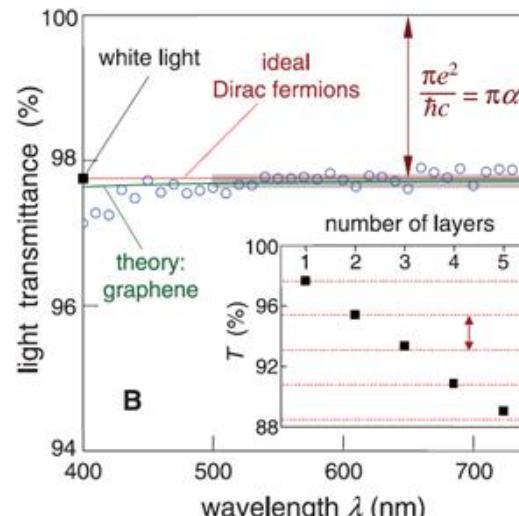
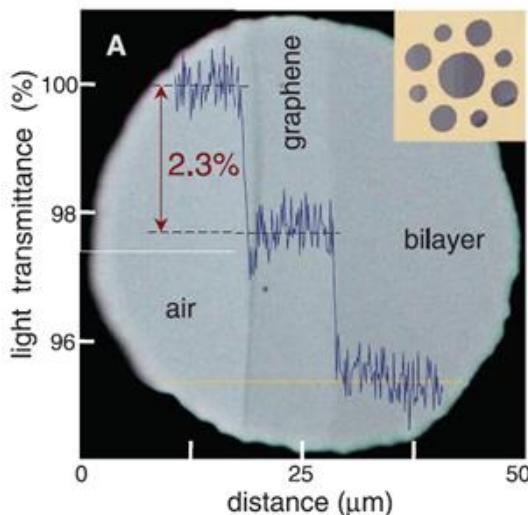
Velika mobilnost



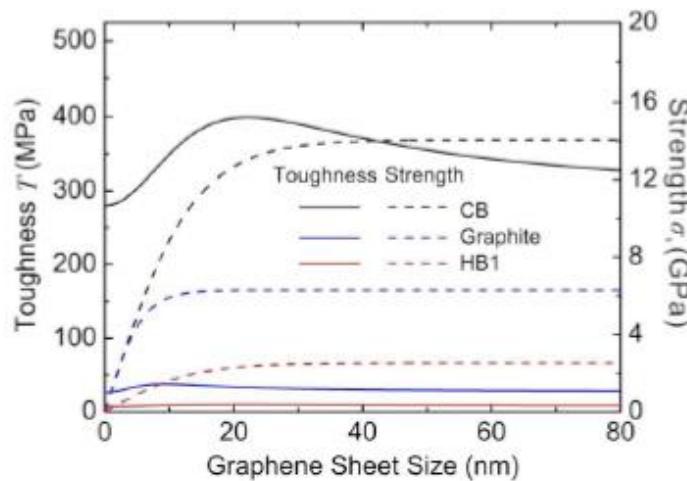
Odsustvo energetskog procjepa



Konstantna apsorpcija u cijelom EM spektru (2.3%)



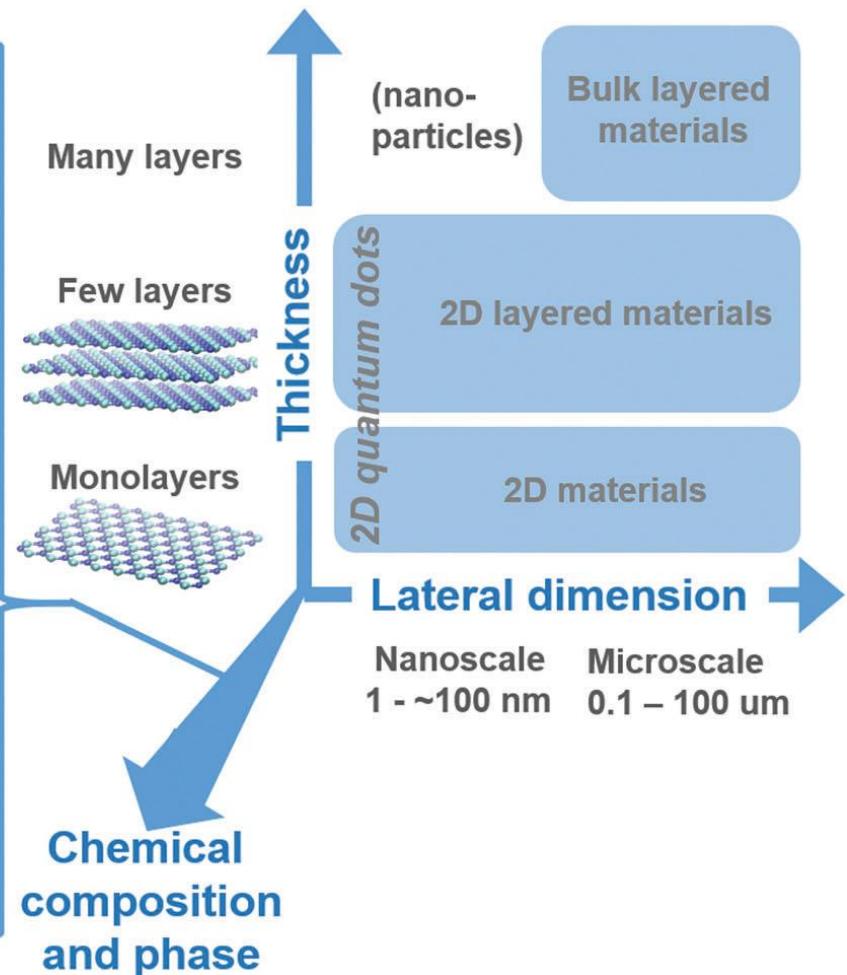
Čvrstoća



2D materijali

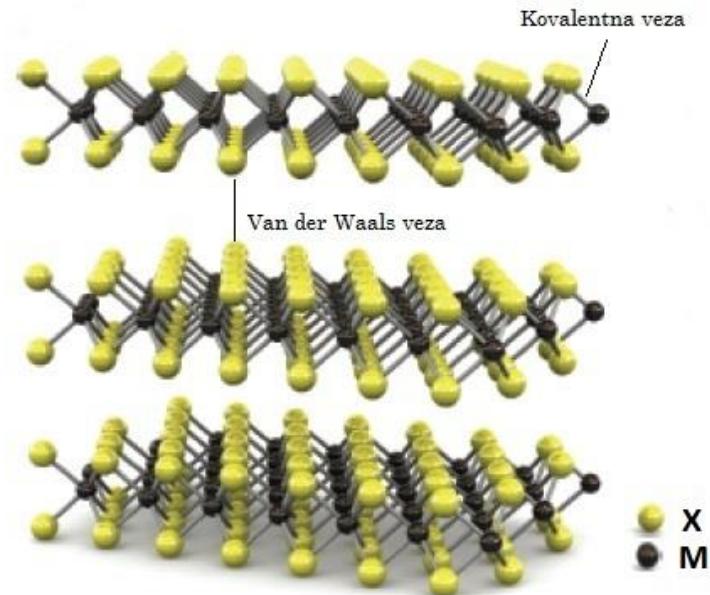
Nova generacija 2D materijala nakon grafena

Mono-Chalcogenides	Trichalcogenides	Thiophosphates	Halides	Sulfates, Phosphates
GeSe, GeTe, GaSe, GaS, InSe, AuSe, Hf ₂ Se, Hf ₂ S, BiO ₂ Se, SnS, SiS, Ti,S, NiTe, CuTe, PbTe, SnTe, PtTe, HfTe, FeS	Bi ₂ Se ₃ , Bi ₂ Te ₃ , Si ₂ Te ₃ , Sb ₂ Te ₃ , Bi ₂ S ₃ , In ₂ Se ₃ , In ₂ Te ₃ , As ₂ S ₃ , As ₂ Se ₃ , As ₂ Te ₃ , NbSe ₃ , Ga ₂ Se ₃ , TiS ₃ , ZrS ₃ , ZrSe ₃ , ZrTe ₃ , HfS ₃ , HfSe ₃ , HfTe ₃ , NbS ₃ , TaS ₃ , TaSe ₃ , NpSe ₃ , USe ₃ , US ₃ , B ₂ S ₃ , NpS ₃ , ThTe ₃ , UTe ₃	FePS ₃ , MnPS ₃ , NiPS ₃ , MgPS ₃ , VPS ₃ , CoPS ₃ , PdPS ₃ , ZnPS ₃ , CdPS ₃ , SnPS ₃ , CuPS ₄ , GePS ₄ , AlPS ₄ , ZnIn ₂ S ₄	FeCl ₃ , FeCl ₂ , MgCl ₂ , CoCl ₂ , VCl ₂ , CrCl ₃ , MoCl ₃ , TiCl ₂ , AlCl ₃ , CdCl ₂ , FeBr ₃ , InBr ₃ , CrBr ₃ , VBr ₂ , CrBr ₃ , MoBr ₃ , TiBr ₃ , InBr, PbI ₂ , VI ₂ , CdI ₂ , TlCl, AuTe ₂ Cl, ZrCl, ZrCl ₄ , UCl ₅ , WCl ₆ , HfCl, SnCl ₂ , CuCl ₂ , HgCl ₂ , PbCl ₂ , AuBrCl ₂ , AuCl ₂ , BCl ₃ , TbCl ₃ , GaCl ₃ , InI, Til, AuI, HgI ₂ , AuCl ₂ , LaI ₂ , CeI ₂ , PTI ₂ , NdI ₂ , ZrI ₂ , ThI ₂ , Bil ₃ , Til ₃ , InI ₃ , ThI ₄ , Nbl ₅ , TlBr, AuTe ₂ Br, Sn ₂ SBr ₂ , TiF, SnPO ₃ F, CuBr ₂ , HgBr ₂ , AuClBr ₂ , CdBr ₂ , AuBr ₃ , AlBr ₃ , PuBr ₃ , UBr ₄ , NpBr ₄ , HfBr ₄ , ZrBr ₄ , SnF ₄ , PbF ₄ , NbF ₄	Pb ₂ O(SO ₄) ₂ , (IO ₄) ₂ SO ₄ , Pb ₃ (PO ₄) ₂
Dichalcogenides		Selenophosphates		Layered Silicates
VSe ₂ , TiS ₂ , ZrS ₂ , SnS ₂ , HfS ₂ , ReS ₂ , PtS ₂ , NbS ₂ , TaS ₂ , MoS ₂ , WS ₂ , GeS ₂ , TiSe ₂ , ZrSe ₂ , HfSe ₂ , ReSe ₂ , PtSe ₂ , SnSe ₂ , TaSe ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂ , TcSe ₂ , TiTe ₂ , ZrTe ₂ , VT ₂ , NbTe ₂ , TaTe ₂ , MoTe ₂ , WTe ₂ , CoTe ₂ , RhTe ₂ , IrTe ₂ , NiTe ₂ , PdT ₂ , PtTe ₂ , SiTe ₂ , CuSbSe ₂ , CuSbS ₂ , CuBiS ₂ , PdS ₂ , ReSSe, Sb ₂ OS ₂ , TcS ₂ , SiS ₂ , PdSeTe, PtSeTe, TaSeTe, CuAgTe ₂ , CuTe ₂		Cr ₂ O ₃ , Egyptian Blue, Bentonite, Cariopilite, Greenalite, Garnierite, Nepourite, Berthierite, Amesite, Grovesite, Cronstedtite, Minnesotaite, Willemseite, Brucite derivatives, Dickite, Bayerite derivatives, Manadonite, Orthoclite, Talc Chlorite, Clinochlore, Corundophilite, Sudoite, Cookeite		
Other chalcogens		Oxyhalides		
MnInSe ₄ , Fe ₃ S ₄ , Y ₂ Te ₅ , Nd ₂ Te ₅ , La ₂ Te ₅ , Ce ₂ Te ₅ , Pr ₂ Te ₅ , Sm ₂ Te ₅ , Cd ₂ Te ₅ , Tb ₂ Te ₅ , Dy ₂ Te ₅ , Ho ₂ Te ₅ , Ge ₂ Bi ₂ Te ₆ , GeSb ₂ Te ₇		BiOCl, FeOCl, HoOCl, ErOCl, ErOCl, AlOCl, PbFCI, AlScI, InTeCl, Cd(OH)Cl, TmOCl, YbOCl, LnOCl, WO ₂ Cl ₂ , WO ₂ I ₂ ,		
Hydroxides		Oxides		Misc.
B(OH) ₃ , SnPO ₃ (OH), B(OH) ₄ , Mo ₂ O ₅ (OH), Cd(OH)Cl		MoO ₃ , MnO ₂ , V ₂ O ₅ , PbO, SnO, Nb ₂ O ₅		MoSi ₂ , PtBi ₂ , GeAs ₂ , SiAs ₂ , NiPo ₂ , TiB ₂ , ScB ₂ , MnB ₂ , AlB ₂ , AlBr ₃ , PuBr ₃ , UBr ₄ , NpBr ₄ , HfB ₂ , P ₂ Sn ₃ , Au ₄ In ₃ Sn ₃ , Th(NH) ₂ , Cr ₂ , SiAs, GeAs
Phosphides		Nitrides		
SiP, SnP, GeP, SiP ₂ , GeP ₃ , SnP ₃ , In ₂ AsP		BN		
Group IV				
Graphenes, Silicenes, Germananes				



TMD (eng. Transition metal dichalcogenides)

- Slojeviti van der Waals materijali
- Formula MX_2
- M je prijelazni metal: Mo, W, Ta, Nb, Ti, Re
- X je halkogenid: S, Se, Te



Električna svojstva	Materijal
Poluvodič	MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , MoTe_2 , WTe_2
Polumetal	TiS_2 , TiSe_2 ,
Metal, CDW, supravodič	NbSe_2 , NbS_2 , NbTe_2 , TaS_2 , TaSe_2 , TaTe_2

MoS_2

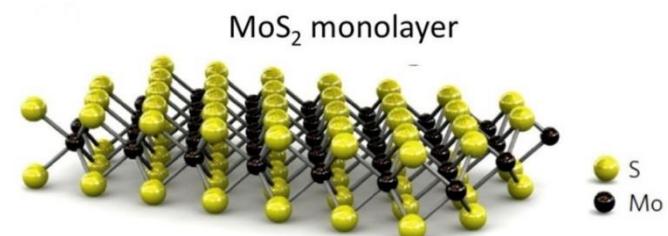
- Cjeloviti oblik:

- Dijamagnetični poluvodič
- Indirektni procjep 1.2 eV
- Lubrikant
- Pronalazi se diljem svijeta u rudi molibdenit

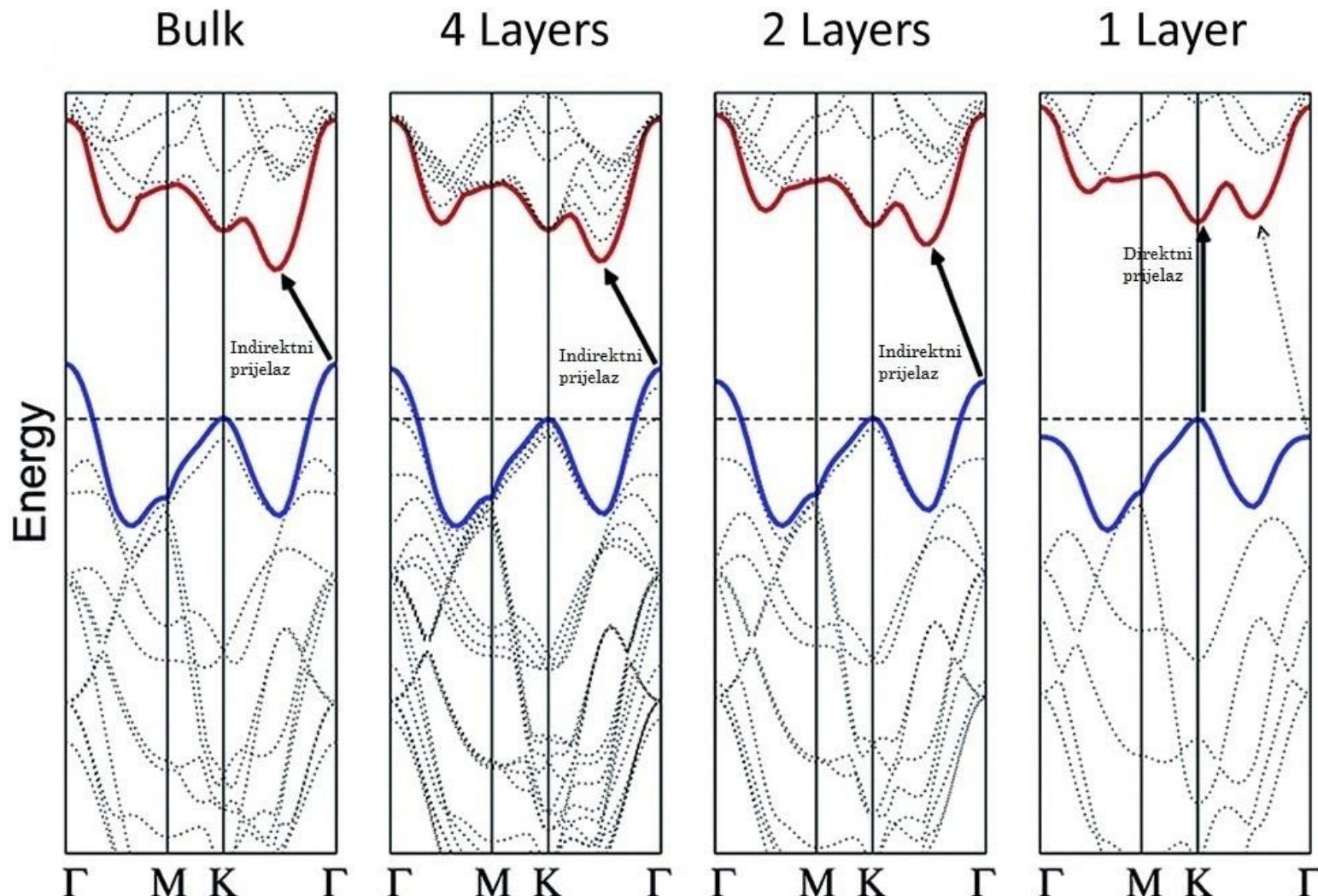


- 2D oblik:

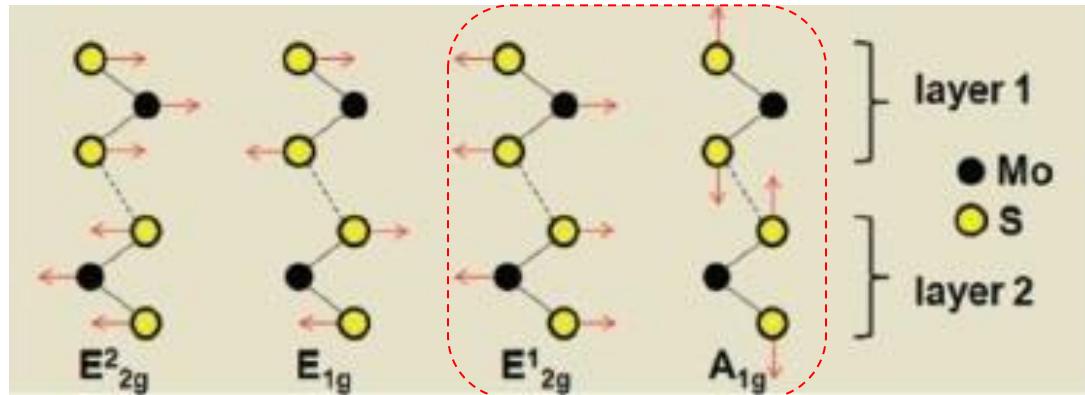
- Jednoslojan MoS_2 :
 - » Direktni procjep 1.9 eV u vidljivom dijelu EM spektra
- Dvoslojan MoS_2 :
 - » Indirektni procjep
- Primjena u elektronici i optoelektronici



Elektronska struktura MoS₂



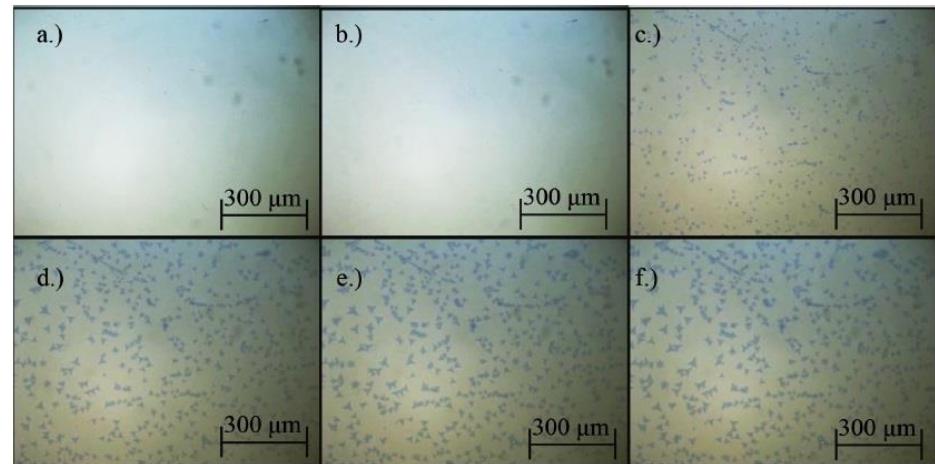
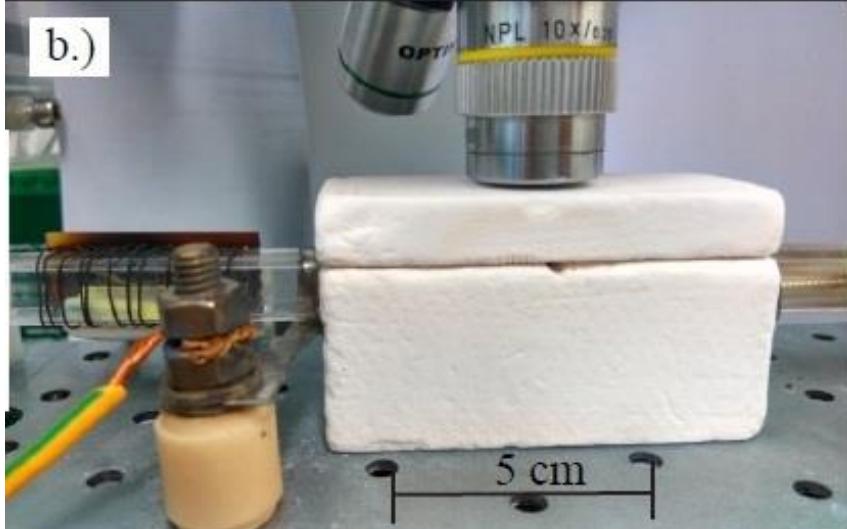
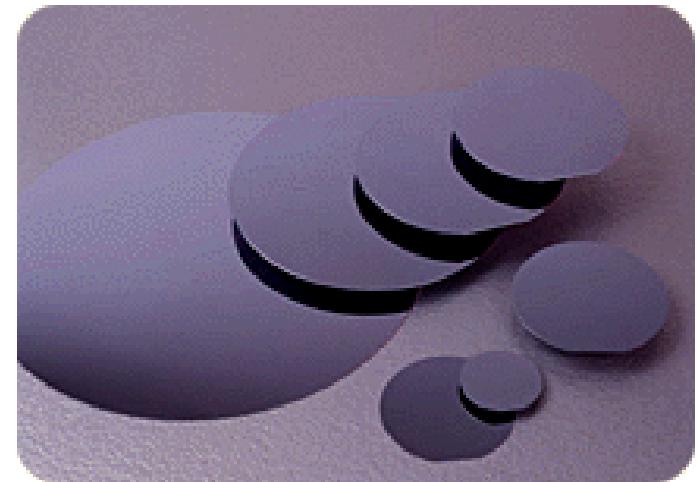
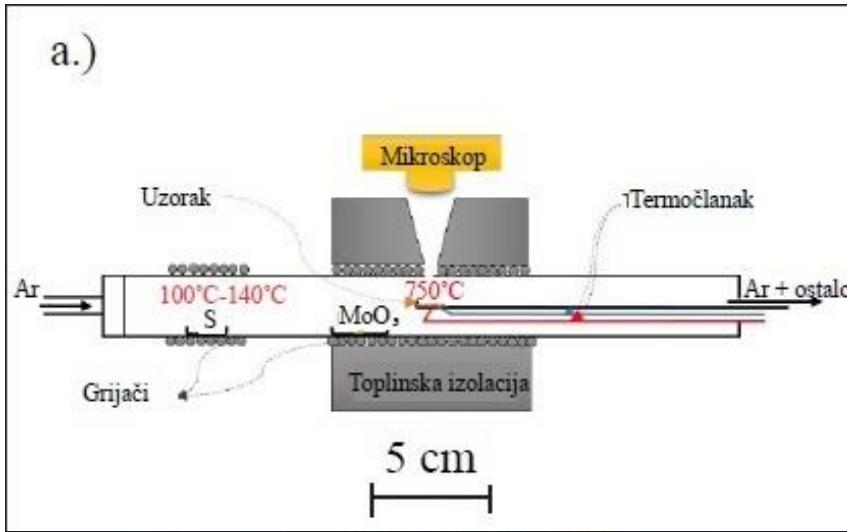
Raman aktivni modovi MoS₂



- E_{2g}^2 optičke vibracije susjednih S-Mo-S slojeva u protufazi
- E_{1g} optičke vibracije S atoma u ravnini, u protufazi
- E_{2g}^1 optičke vibracije susjednih Mo i S atoma u ravnini, u protufazi
- A_{1g} optičke vibracije S atoma izvan ravnine, u protufazi

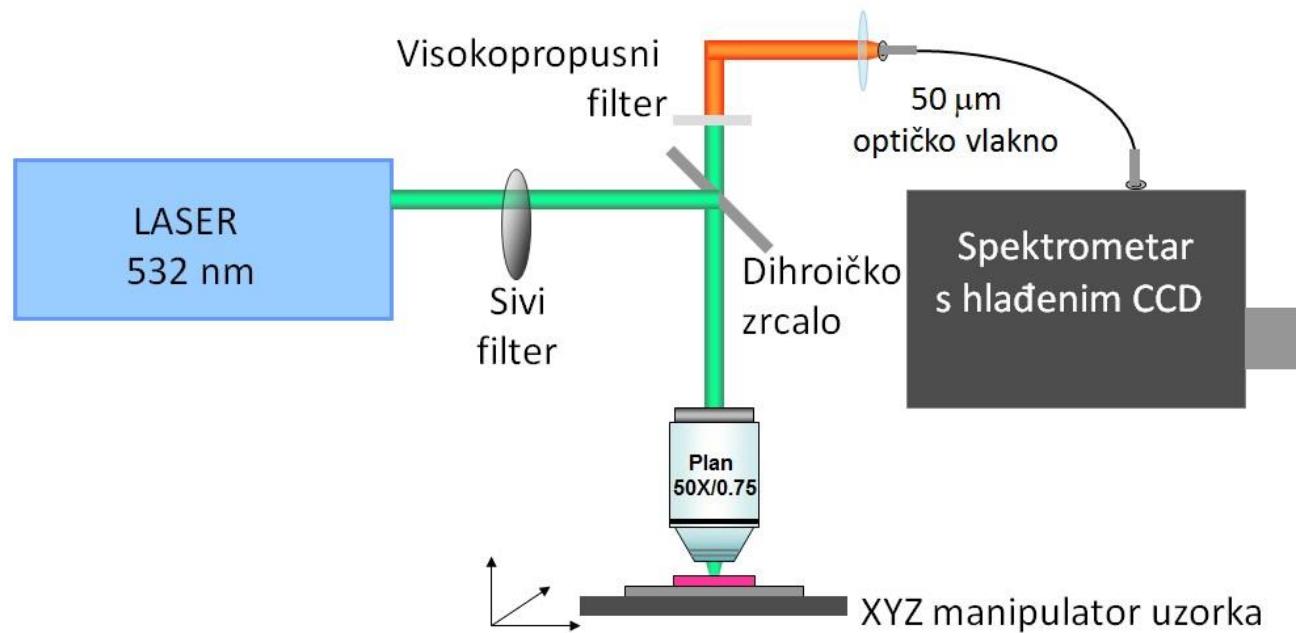
Eksperimentalni postav

- Priprema uzoraka:
 - CVD (eng. Chemical vapor deposition)
 - Podloga SiO_2/Si wafer



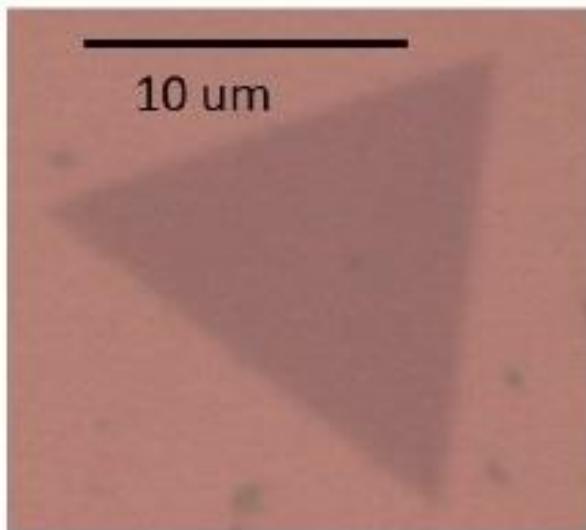
Eksperimentalni postav

- Optički postav Raman spektrometra:
 - Konfokalni mikroskop
 - Kućne izrade

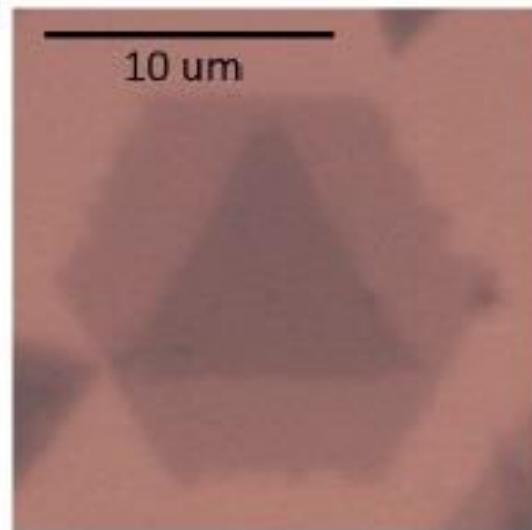


AFM karakterizacija

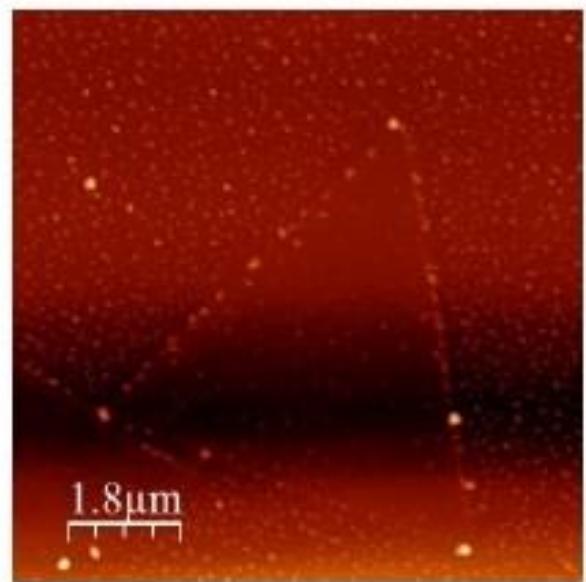
a)



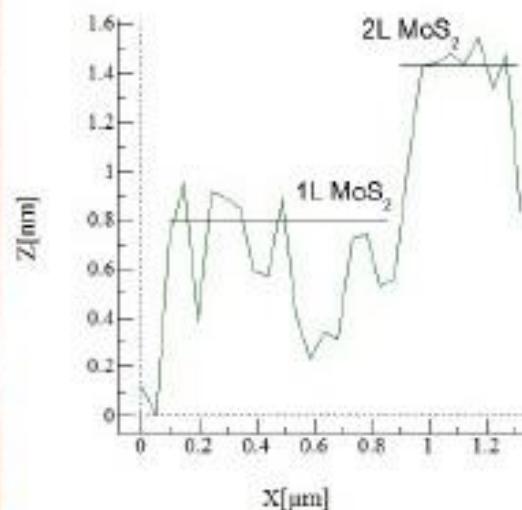
b)



c)



d)



Ekscitoni

- Vezana stanja par šupljina elektron:

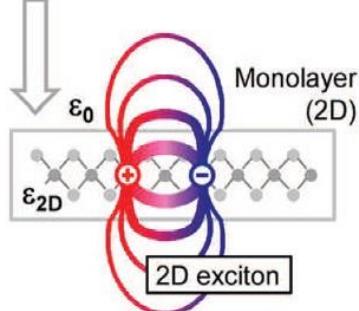
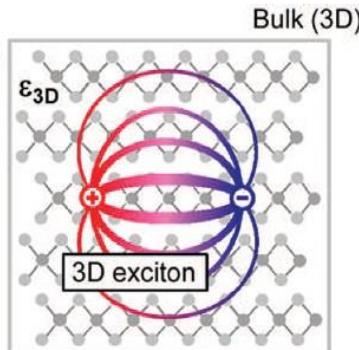
- Frenkelovi:

- » Organski materijali

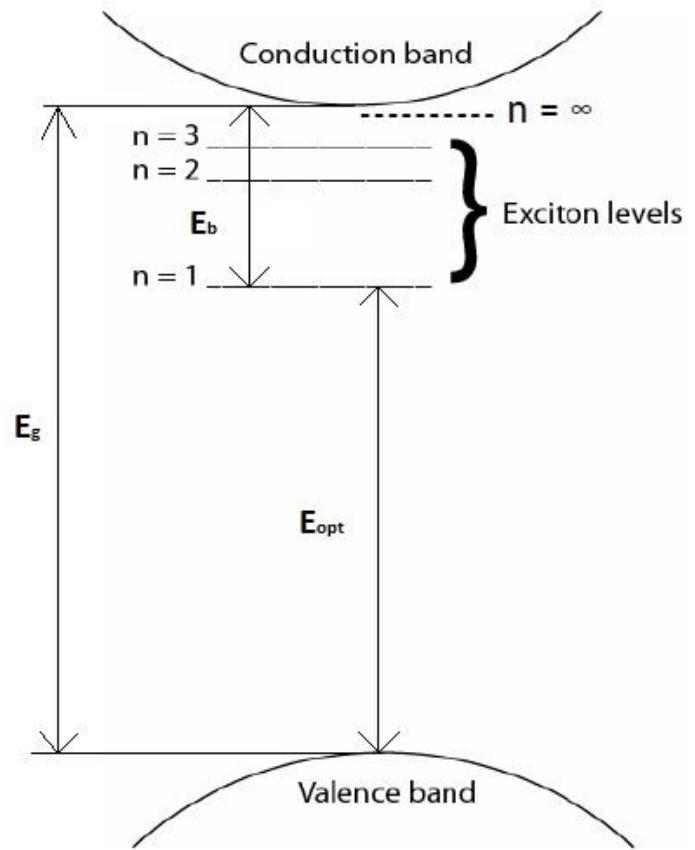
- Wannier-Mottovi:

- » Anorganski poluvodiči

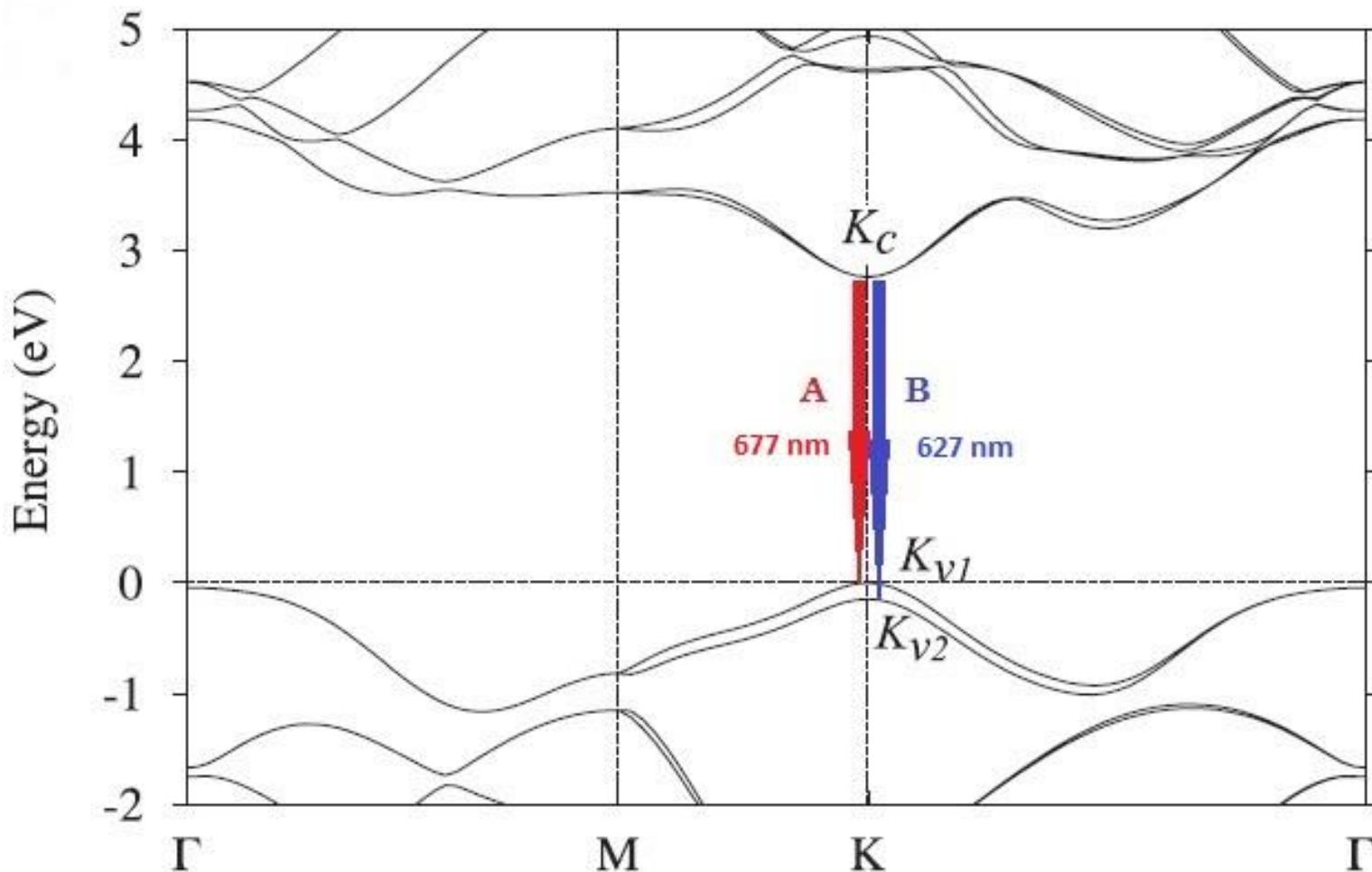
- » Energija vezanja 500 meV



A. Chernikov, T. C. Berkelbach, H. M. Hill, A. Rigosi, Y. Li, O. B. Aslan, D. R. Reichman, M. S. Hybertsen, and T. F. Heinz,
„Exciton binding energy and nonhydrogenic
rydberg series in monolayer WS₂”, Phys. Rev. Lett., vol. 113,
no. 7, p. 076 802, 2014.

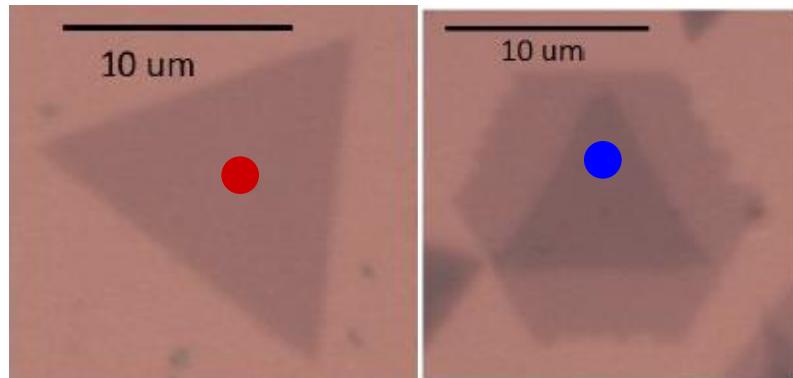
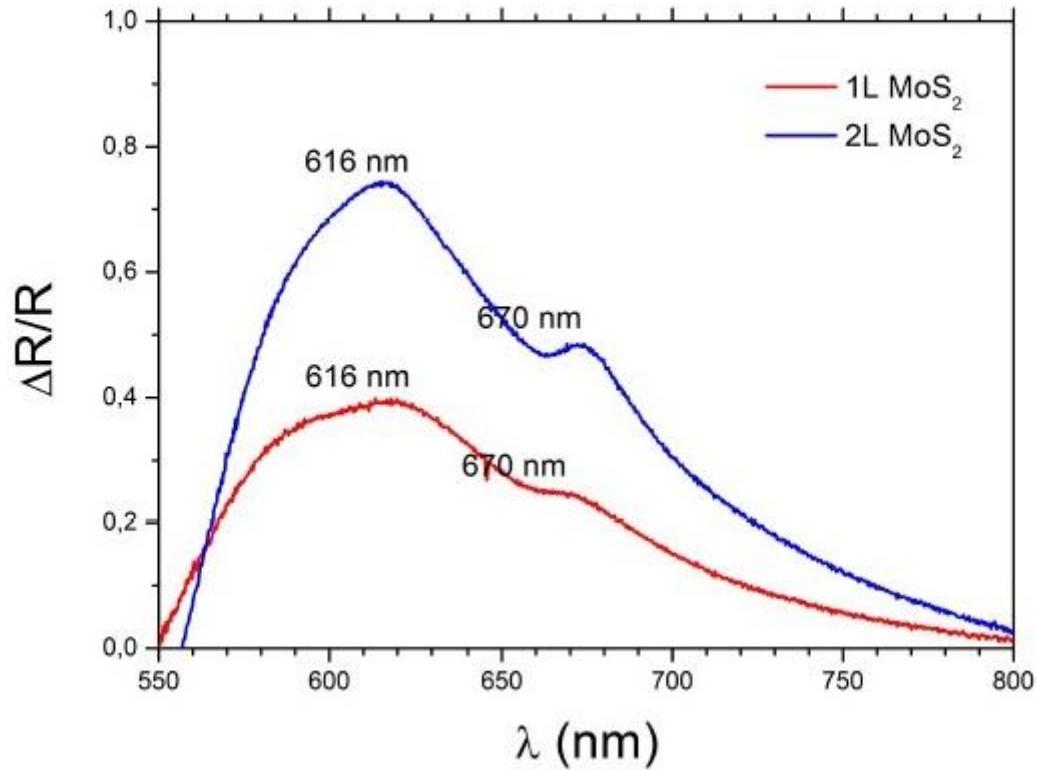
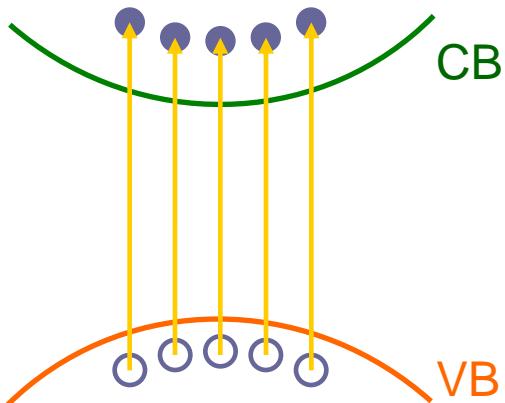


Cijepanje valentne vrpce MoS₂



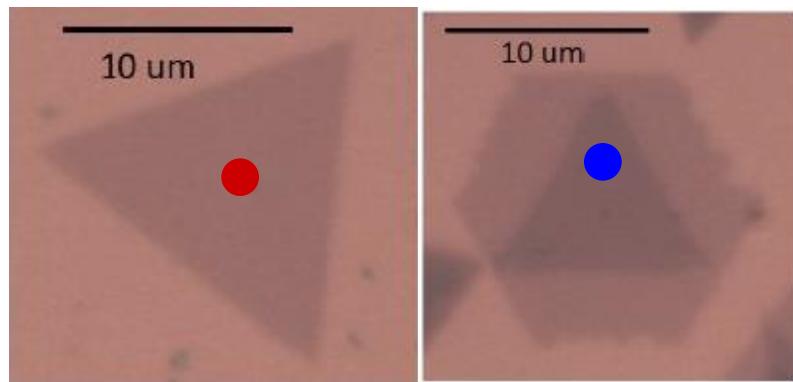
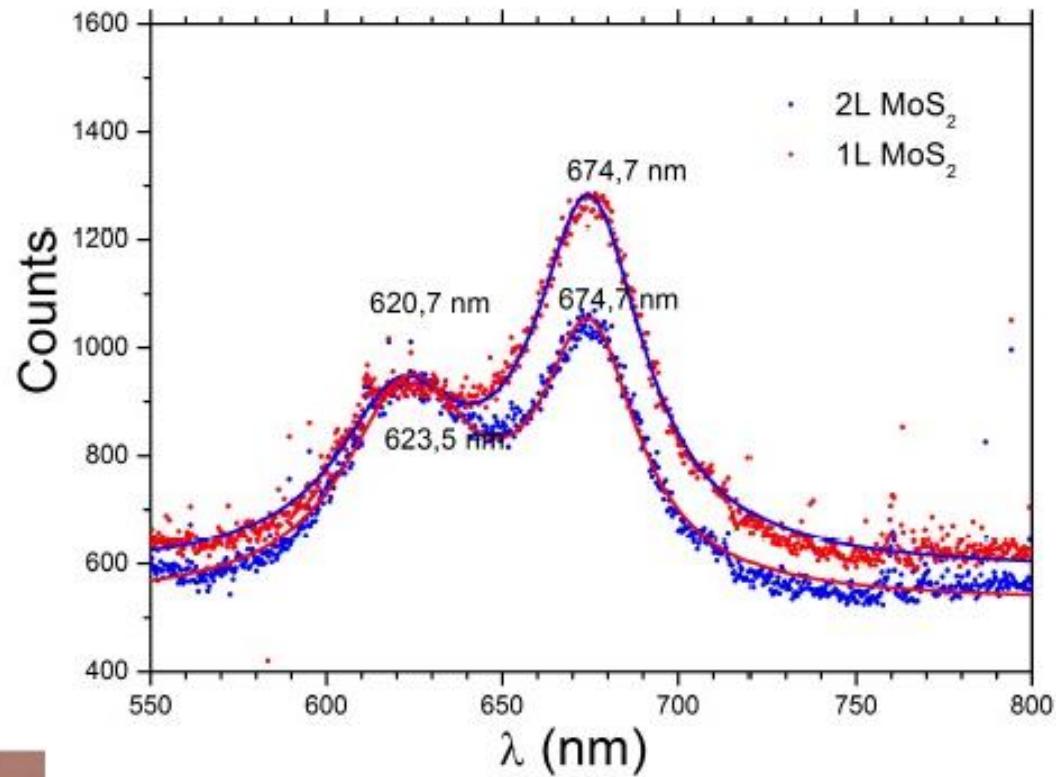
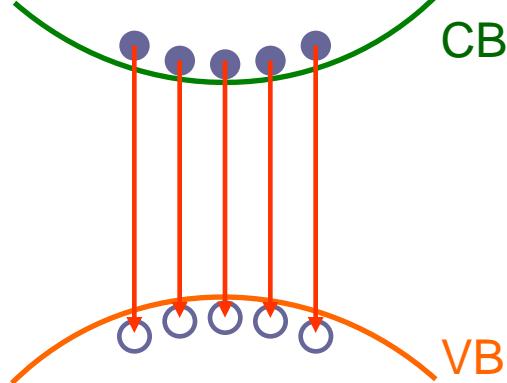
Tawinan Cheiwchanchamnangij and Walter R.L. Lambrecht, "Quasiparticle band structure calculation of monolayer, bilayer, and bulk MoS₂", Phys. Rev. B 85, 205302 Published 2 May 2012

Apsorpcija



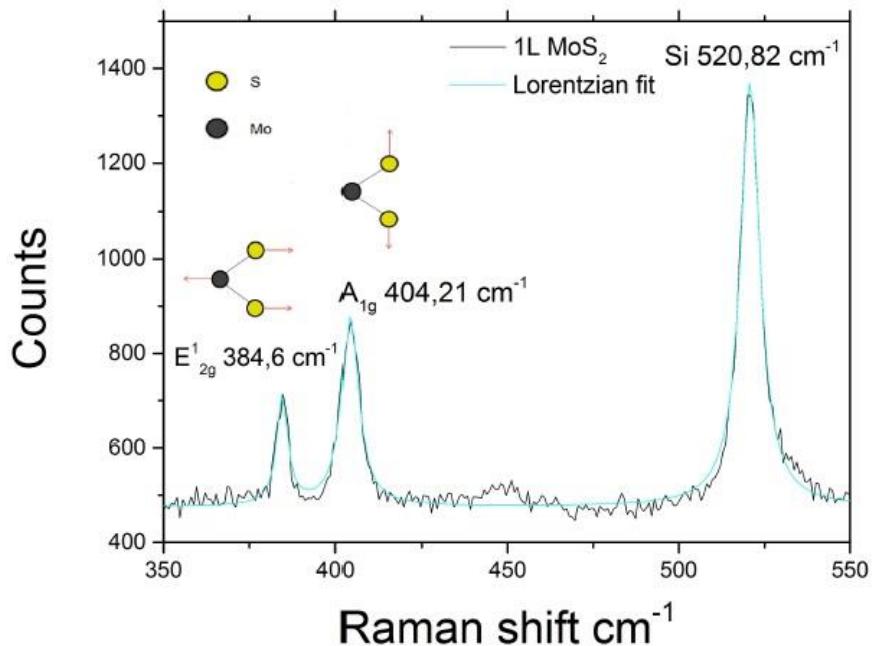
$$\Delta R/R = 1 - \frac{R_{\text{uzorak}}}{R_{\text{podloga}}}$$

Fotoluminiscencija

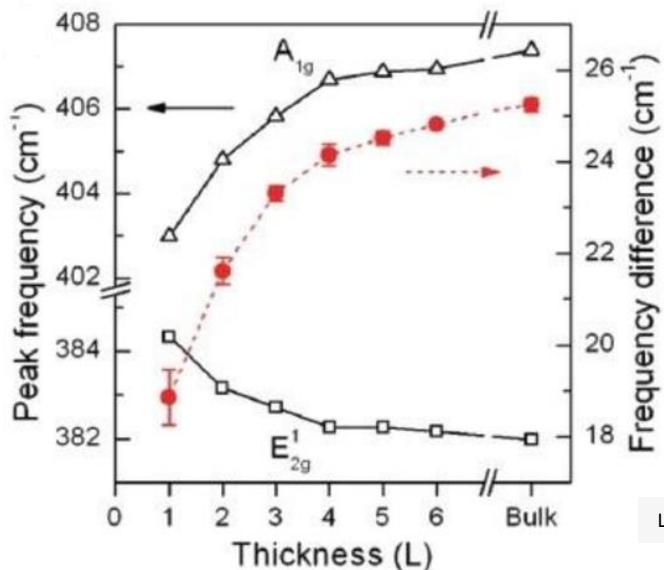
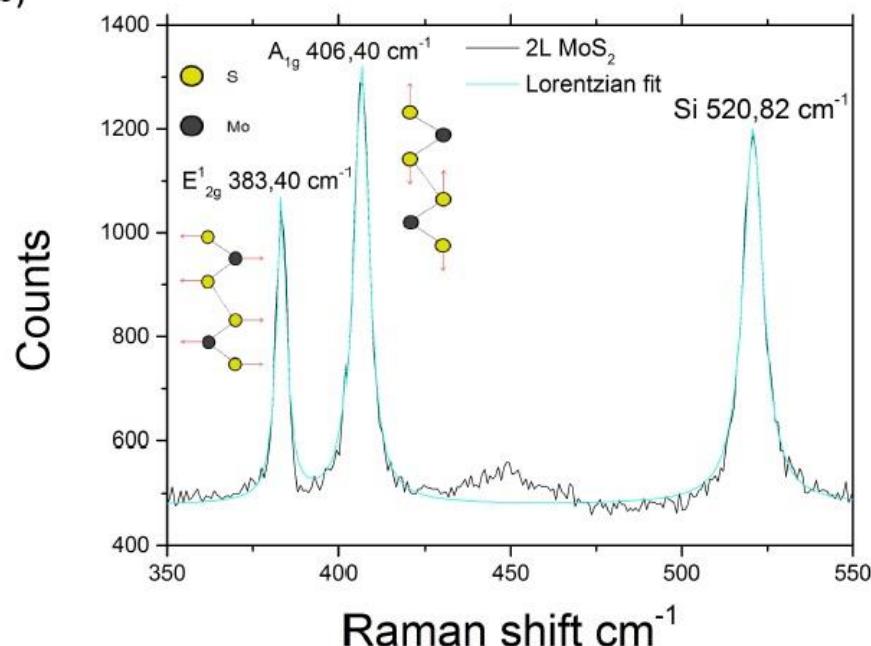


Raman spektroskopija

a)



b)



Zaključak

- AFM karakterizacija:
 - Izmjerili visine jednosloja i dvosloja MoS₂
 - Odstupanje od teoretske debljine jednoslojnog MoS₂ na podlozi zbog moguće dodatne adsorpcije
- Fotoluminiscencija:
 - Porast intenziteta fluorescencije ekscitona A na prijelazu s dvosloja na jednosloj MoS₂
 - Položaj eksitonskih rezonanci pomaknut u crveno u odnosu na apsorpcijski spektar što je posljedica Stokeovog pomaka
- Apsorpcija:
 - Intenzitet apsorpcijskog spektra dvoslojnog MoS₂ je veći od jednoslojnog
 - Položaj rezonantnih maksimuma ostaju isti u jednoslojnom i dvoslojnom MoS₂
- Raman spektroskopija:
 - Frekvencija E¹_{2g} vibracijskog moda se smanjuje, dok se frekvencija A_{1g} povećava
 - Pomak frekvencije E¹_{2g} u crveno neočekivan unutar modela slabog vezanja vdW sila među slojevima
 - Ukazuje na postojanje drugih bitnih pojava:
 - » Strukturne pojave uzrokovane različitim vezanjima između slojeva
 - » Dugodosežne Coulomb interakcije među slojevima

Daljnji planovi

- Nastavak razvoja optičkih metoda za karakterizaciju TMD
 - prostorno mapiranje
 - polarizacijski osjetljiva mjerena
 - druga generacija *home-made* spektrometra
- Sinteza novih materijala iz porodice TMD
 - ispitivanja njihovih optičkih svojstava
- Heterostrukture

Zahvale

- Mentorici: Nataši Vujičić na stalnoj podršci, ugodnoj radnoj atmosferi i savjetima.
- Voditelju projekta: Marko Kralj
- Kolegama:
 - Davor Čapeta
 - Borna Radatović
 - Ida Delač-Marion
 - Borna Pielić
 - Marko Spasenović



Institut za fiziku

