

Атомарно-тонкие дихалькогениды переходных металлов: необычные свойства и перспективы

М.М. Глазов

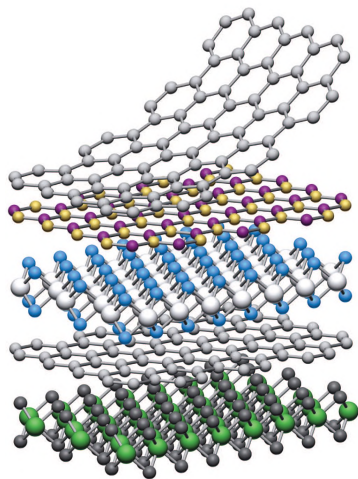
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

План доклада

- 1 Введение: 2D дихалькогениды переходных металлов
- 2 Управление оптическим откликом экситонов
- 3 Заключение и перспективы

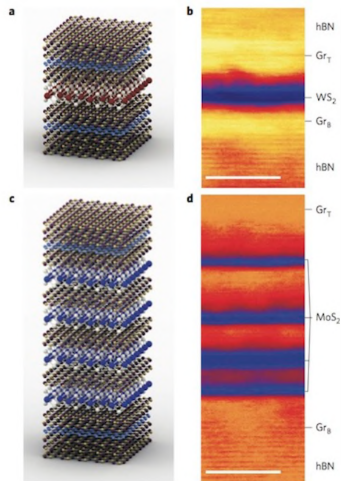
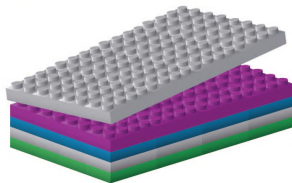
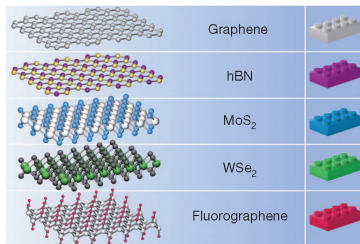
23 июня 2022 г. Научный совет РАН "Квантовые технологии"

— платформа для ван-дер-ваальсовых гетероструктур



Geim, Grigorieva (2013)

Не требуется согласование решеток



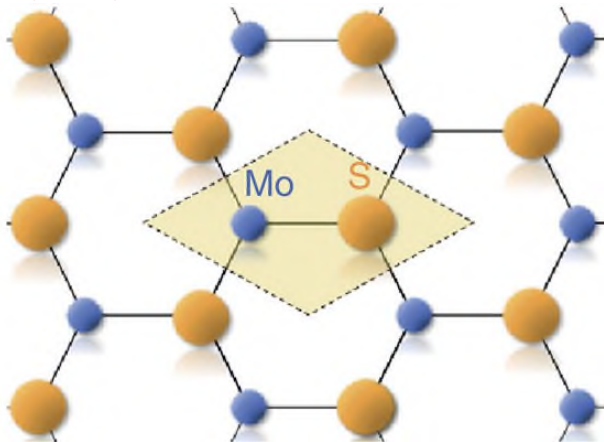
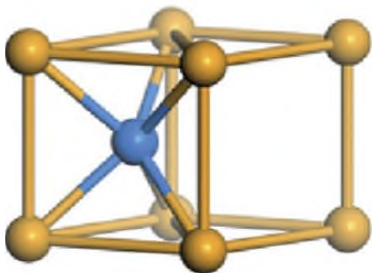
Withers et al. (2015)

Новая степень свободы – угол между слоями

Дихалькогениды переходных металлов

Пример: **дисульфид молибдена** MoS_2 Mo, S – элементы VI-ой группы

Аналогичные материалы MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ...



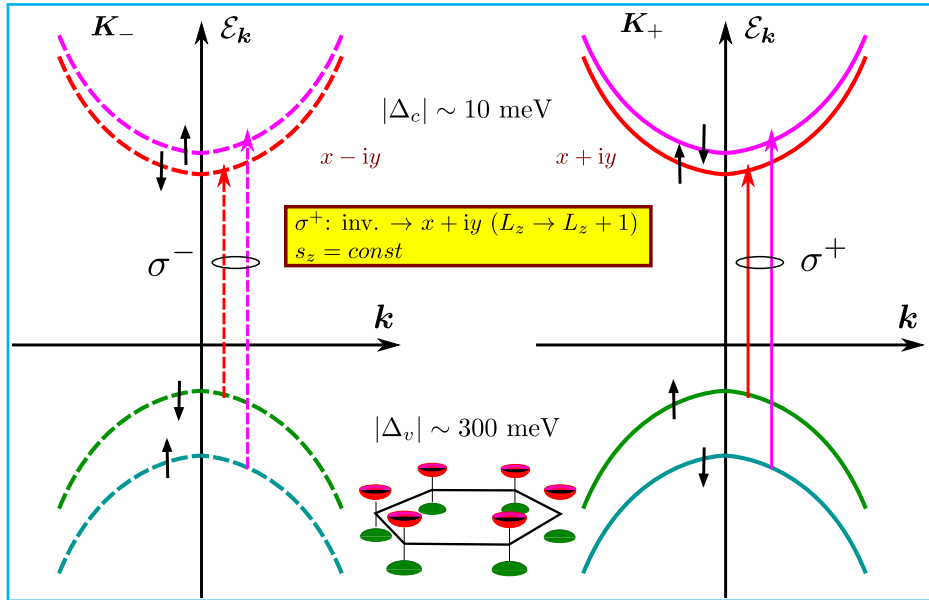
Объемный материал – **непрямозонный** полупроводник ($E_g \approx 1.2 \text{ eV}$)

Frindt (1966); Wilson & Yoffe (1969)

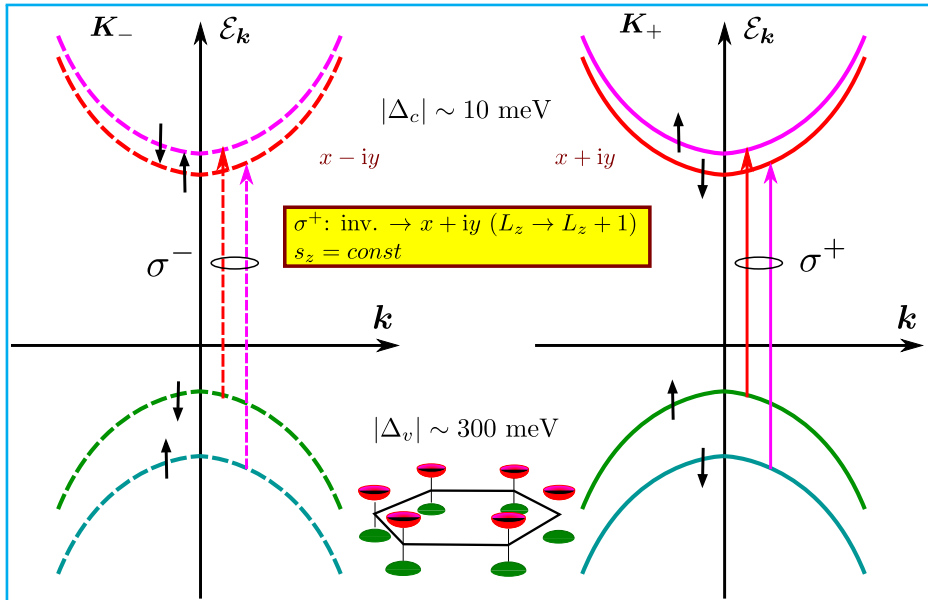
Монослой MoS_2 обладает **прямой** запрещенной зоной около 2 eV

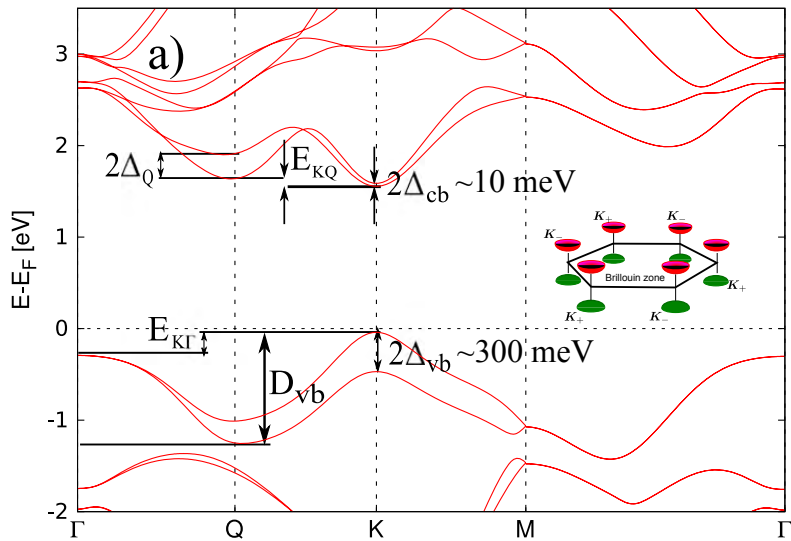
Mak et al. (2010); Splendiani et al. (2010)

на основе молибдена



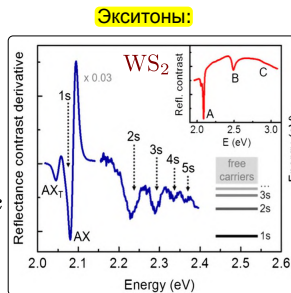
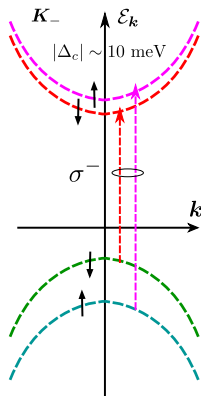
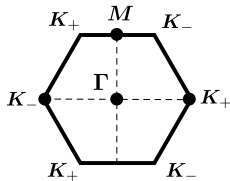
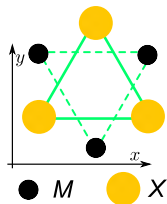
на основе вольфрама



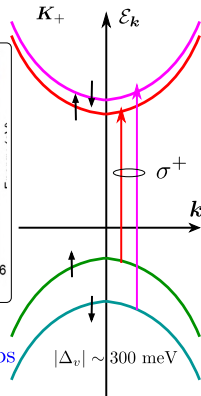


Kormanyos et al. (2015)

Дихалькогениды переходных металлов: $M=\text{Mo}$ или W , $X=\text{S}$, Se или Te



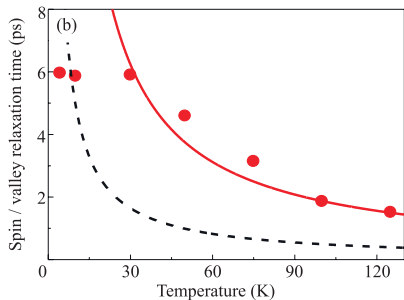
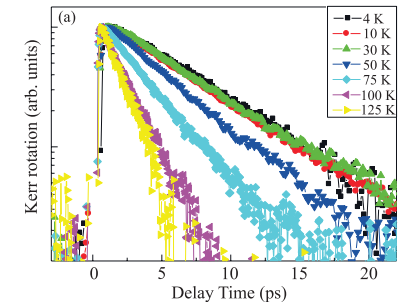
$E_{2B} \approx 200 \dots 500 \text{ meV}$
 $a_B \approx 10 \dots 30 \text{ \AA}$, $\tau_X \sim 1 \text{ ps}$



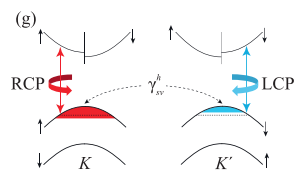
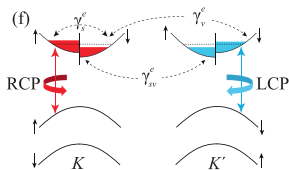
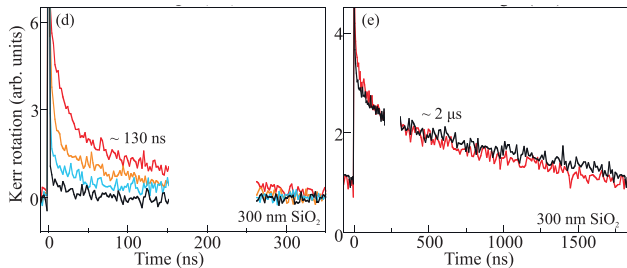
- Прямозонные полупроводники $E_g \approx 2 \text{ эВ}$
- Две долины K_+ и K_-
- Спин-орбитальное взаимодействие
- Киральные оптические правила отбора
- Кулоновские эффекты: экситоны

- Платформа для ван-дер-ваальсовых гетероструктур *Geim, Grigorieva (2013)*
- Транзисторы *Radisavljevic, ..., Kis (2011)*
- Лазеры и однофотонные источники *Wu, ..., Xu (2015); Koperski, ..., Potemski (2015)*

Экситоны – быстрая долинная
релаксация (e-h обмен)



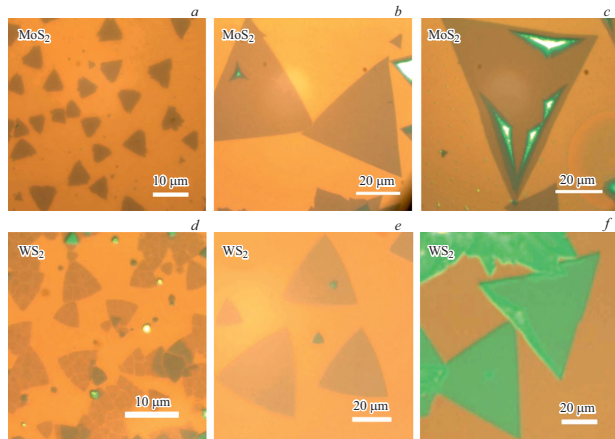
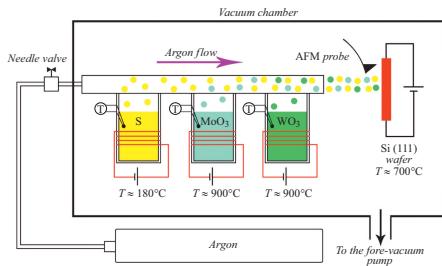
Электроны и дырки – медленная
спиновая/долинная релаксация (фононы)



обзор: Письма ЖЭТФ **113**, 10 (2021)



Технология: С.А. Смагулова и др.
СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск)



Смагулова и др. (2020, 2021)

Экситоны определяют оптические свойства монослоев MX_2 :

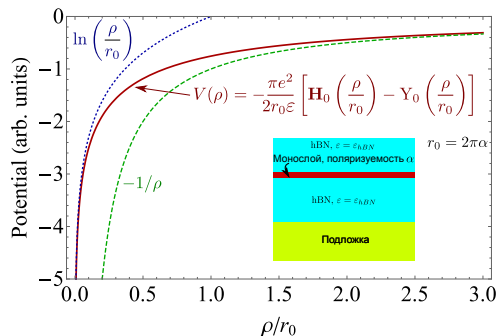
$$E_{2B} \approx 200 \dots 500 \text{ meV}, \quad a_{2B} \approx 10 \dots 30 \text{ \AA}$$

радиационное время жизни: $\tau_X = 1/(2\Gamma_0) \sim 1 \text{ ps}$

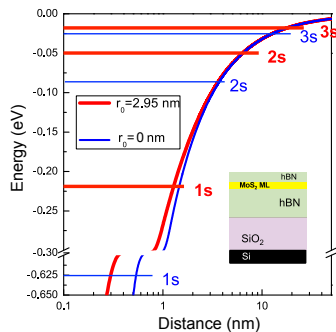
Обзоры: *Rev. Mod. Phys.* **90**, 021001 (2018); *УФН* **188**, 913 (2018) (2018)

Кулоновский потенциал с учетом диэлектрического контраста

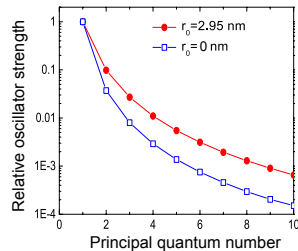
Н.С. Рытова (1967)
Л.В. Келдыш (1979)



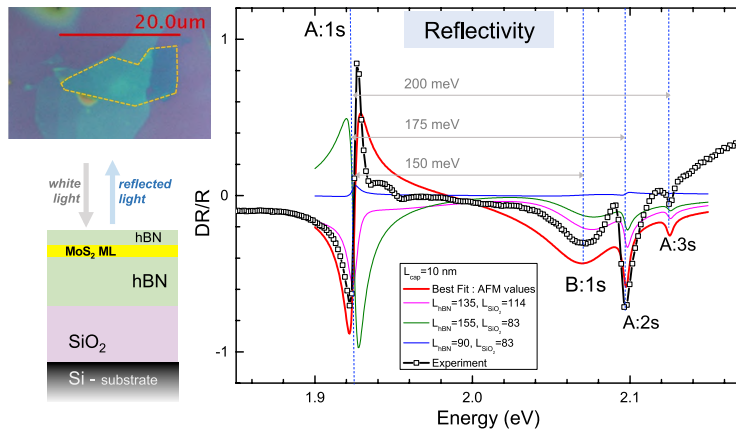
Экситонная серия



Относительные силы осциллятора

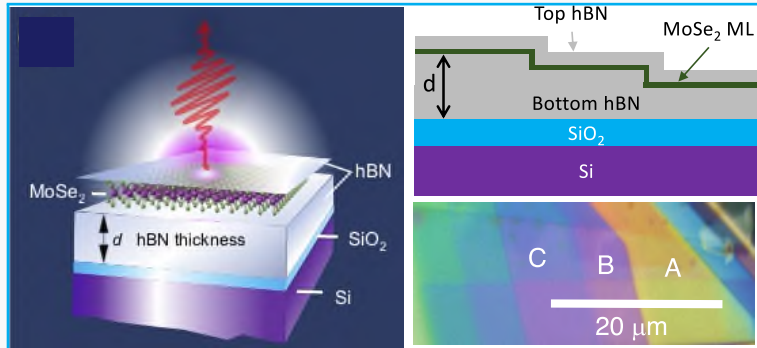


$$E_{2B} = \frac{2\mu e^4}{\epsilon^2 \hbar^2} \approx 200 \dots 500 \text{ meV}, \quad a_{2B} = \frac{\epsilon \hbar^2}{2\mu e^2} \approx 5 \dots 15 \text{ \AA}, \quad \hbar \Gamma_0 \sim 1 \text{ meV}$$



Важен “резонаторный” эффект (переотражения света)

Phys. Rev. Materials 2, 011001(R) (2018)

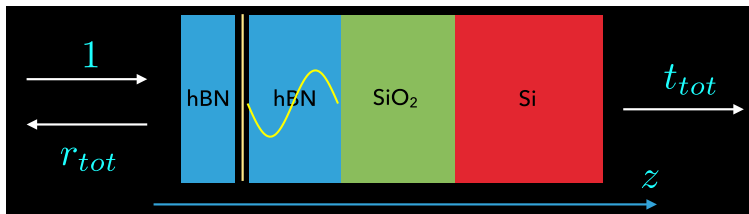


СОБМЕСТНО С

H.H. Fang, B. Han, C. Robert, D. Lagarde, E. Courtade, T. Amand, B. Urbaszek, and X. Marie
(INSA-Toulouse)

T. Taniguchi, K. Watanabe (NIST, Tsukuba)

Phys. Rev. Lett. **123**, 067401 (2019)



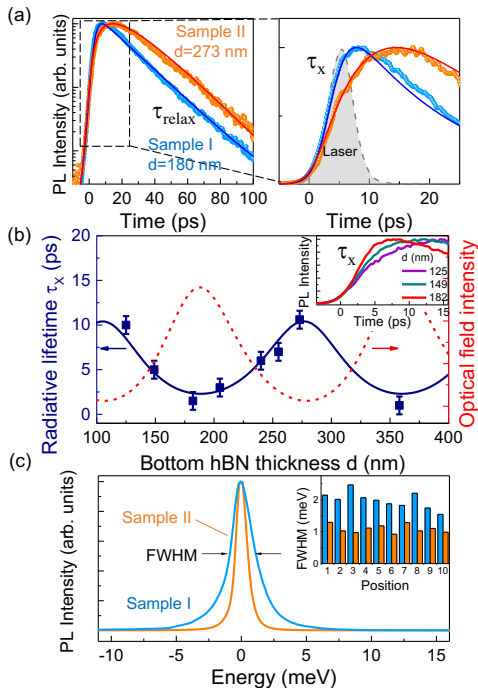
$$\hat{T}_{tot} = \hat{T}_{\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Si}} \hat{T}_{\text{SiO}_2} \hat{T}_{\text{hBN} \rightarrow \text{SiO}_2} \hat{T}'_{\text{hBN}} \hat{T}_{\text{MoSe}_2} \hat{T}_{\text{hBN}} \hat{T}_{\text{air} \rightarrow \text{hBN}}$$

Линейные отклик

собственные моды – полюса коэффициента отражения

$$r_{tot}(\omega) = \frac{Z_r}{\omega_0^{\text{eff}} - \omega - i(\Gamma_0^{\text{eff}} + \Gamma)} + \dots$$

$$\Gamma_0^{\text{eff}} \approx \Gamma_0(1 + \text{Re}\{r_s\})$$



Модель двух резервуаров

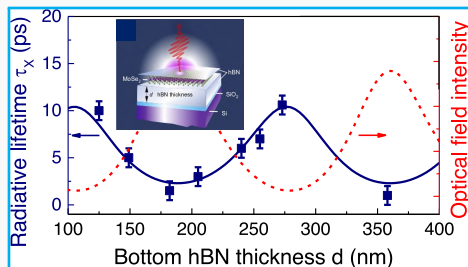
$$\frac{dn_{hot}}{dt} = -\frac{n_{hot}}{\tau_{relax}},$$

$$\frac{dn_x}{dt} = -\frac{n_x}{\tau_{rad}} + \frac{n_{hot}}{\tau_{relax}},$$

$$I(t) \propto \frac{n_{hot}^{(0)}}{\tau_{relax} - \tau_{rad}} \times \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{relax}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{rad}}\right) \right]$$

$$\tau_{relax} \gg \tau_{rad}$$

Радиационное время τ_{rad} определяет время нарастания сигнала фотолюминесценции



Наблюдается значительный эффект Парселла

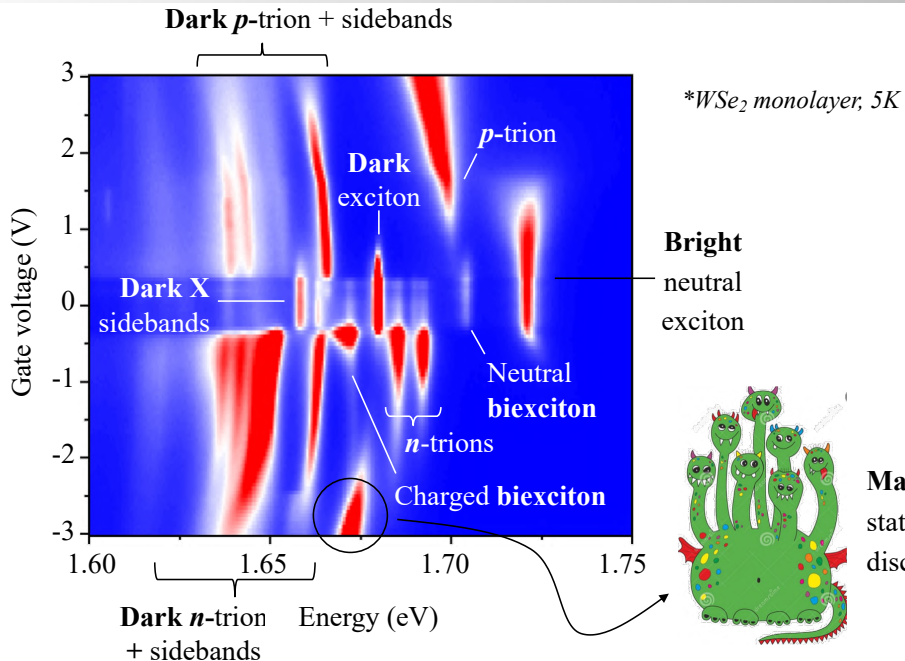
- Увеличение радиационного времени жизни экситона до ~ 10 ps
- Уменьшение радиационного времени жизни экситона до ~ 0.5 ps
- Время спонтанного излучения в вакуум $\tau_0^{\text{vac}} = 2.7$ ps

Также окружение значительно влияет на спиновую/долинную релаксацию экситонов

PRB **103**, 085302 (2021)

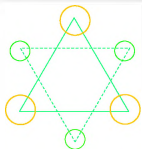
see also:

Horng et al., *Optica* **6**, 1443 (2019), Zhou et al., *Phys. Rev. Lett.* **124**, 027401 (2020); Rogers et al., *Phys. Rev. Research* **2**, 012029 (2020); Groep et al., *Nat. Photonics* **14**, 426 (2020).



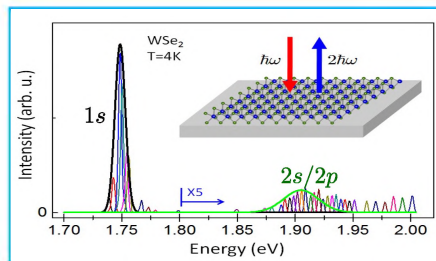
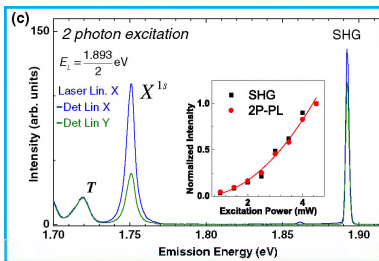
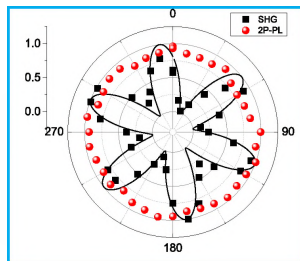
Many-particle
state under
discussion...

courtesy of A. Chernikov (TU-Dresden)



$$P_x = 2\chi^{(2)} E_x E_y, \quad P_y = \chi^{(2)} (E_x^2 - E_y^2)$$

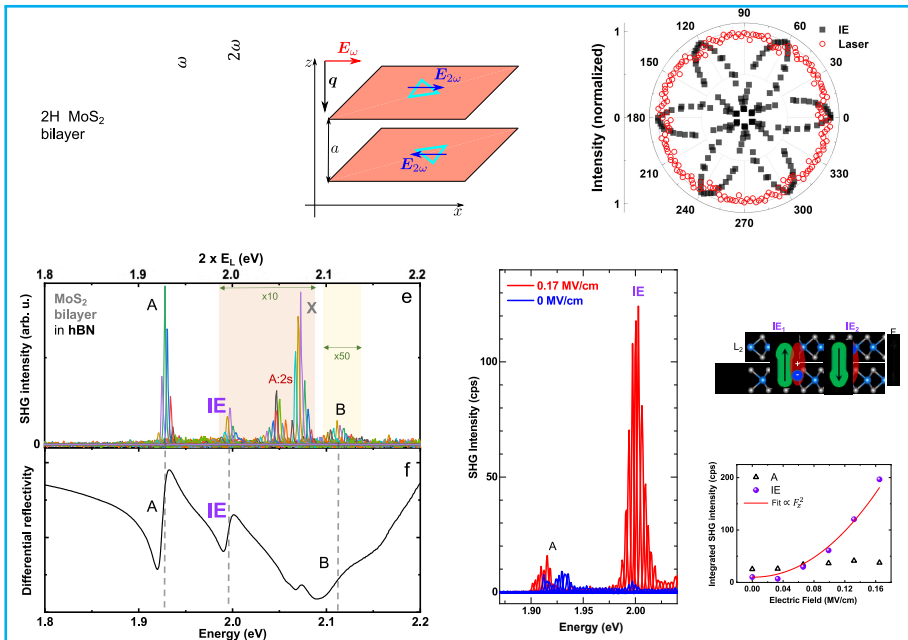
правила отбора: $\sigma^+ \sigma^+ \rightarrow \sigma^-$, $\sigma^- \sigma^- \rightarrow \sigma^+$



Estimates

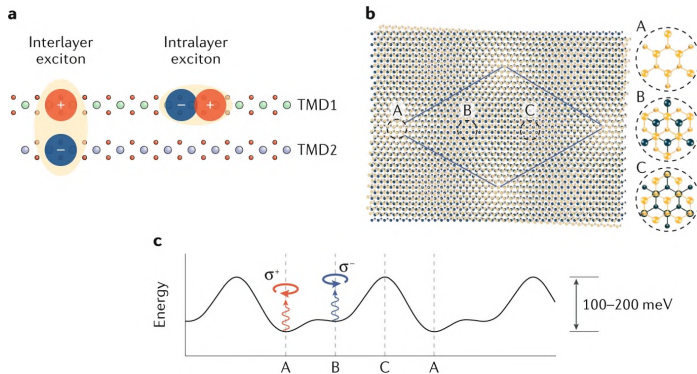
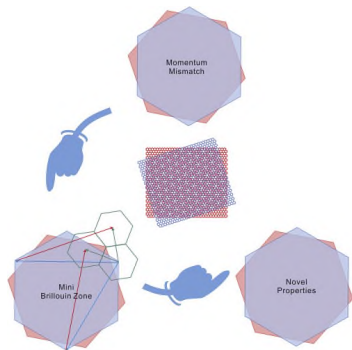
основной вклад от $1s$ состояния

$$\frac{\chi_{1s}^{(2)}}{\chi_{2p}^{(2)}} \sim \frac{E_g}{E_B} \frac{\Gamma_{2p}}{\Gamma_{1s}} \gg 1$$



Эффекты муара – управление экситонными свойствами

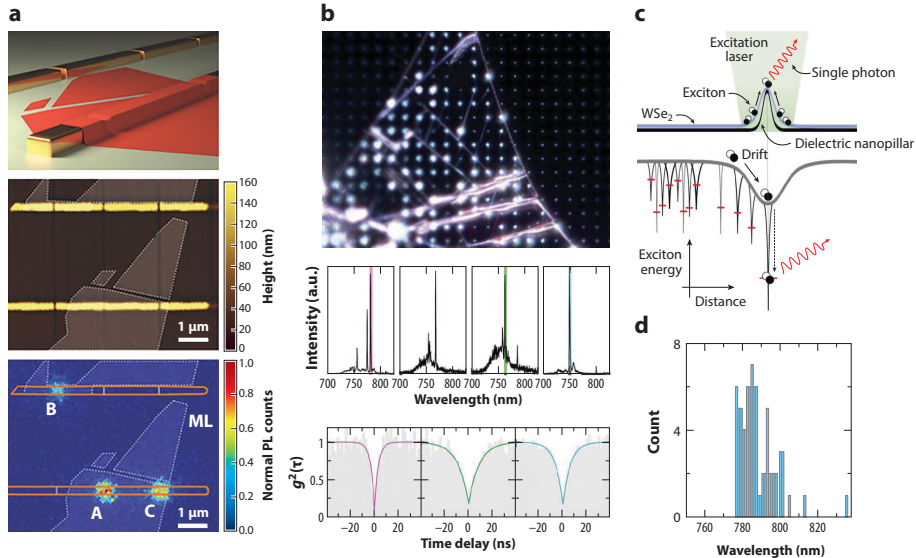
Муар – эффект наложения периодических структур, при котором возникают **новые структуры** (узоры), отсутствующие в исходных.



Seyler et al., Nature **567**, 66 (2019); Tran et al., Nature **567**, 71 (2019); Jin et al., Nature **567**, 76 (2019); Alexeev et al., Nature **567**, 81 (2019)

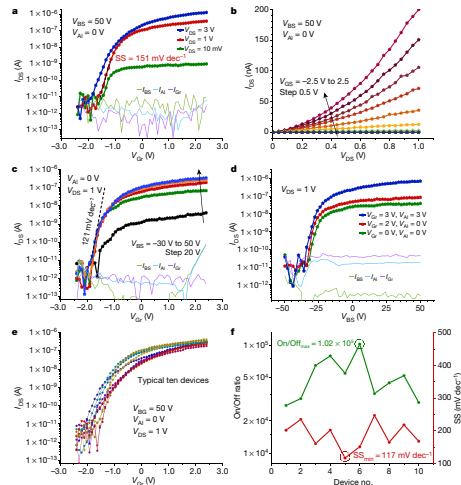
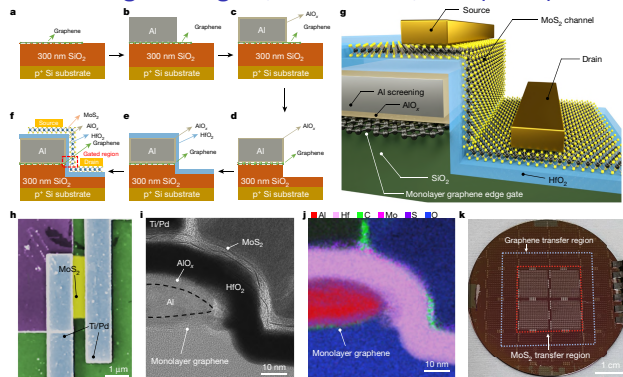
Скрученные бислои – киральные структуры, **циркулярная поляризация излучения**
без магнитного поля

Poshakinskiy, Kazanov, Shubina, Tarasenko, Nanophotonics **7**, 753 (2018); Michl, Tarasenko, et al. arXiv:2105.09948 (2021)



обзор: M. Toth, I. Aharonovich, Single Photon Sources in Atomically Thin Materials, Ann. Rev. Phys. Chem. **70**, 123 (2019)

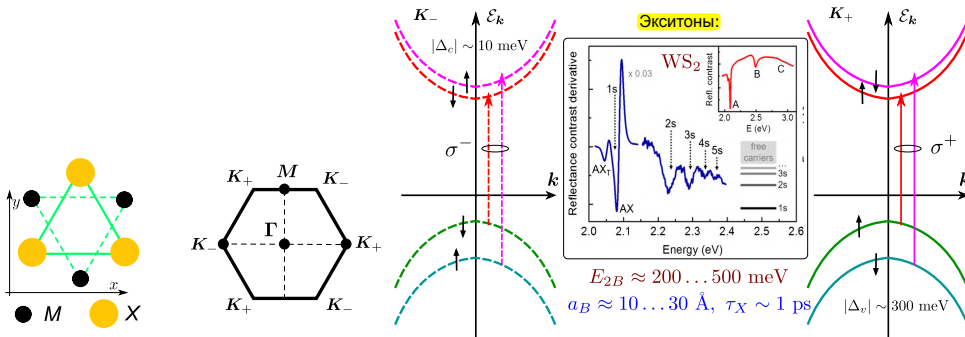
Wu, Tian, Shen, et al., Vertical MoS₂ transistors with sub-1-nm gate lengths, Nature **603**, 259 (2022)



- **ФТИ им. А.Ф. Иоффе:** М.В. Дурнев, Л.Е. Голуб, М.А. Семина, Е.Л. Ивченко
- **ФИАН им. П.Н. Лебедева:** В.В. Белых, М.В. Кочиев
- **СВФУ им. Н.К. Аммосова:** П.В. Винокуров, С.А. Смагулова
- **TU-Dresden/Uni-Regensburg:** A. Chernikov, K. Lin, K. Wagner, E. Wietek, J. Ziegler
- **U. Chalmers/Phillips-Marburg Uni:** R. Rosati, R. Perea-Causín, E. Malic
- **INSA-Toulouse:** G. Wang, S. Shree, C. Robert, X. Marie, B. Urbaszek, T. Amand
- **IOP Beijing:** C.R. Zhu, B. Liu

Атомарно-тонкие дихалькогениды переходных металлов обладают необычными оптическими и транспортными свойствами и широким диапазоном применений.

- Сильное кулоновское взаимодействие. Экситоны, вигнеровский кристалл, ...
- Спиновые и долинные степени свободы. Киральные правила отбора, долинные токи
- Применения: источники квантового света, транзисторы, ...



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!