

# ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА

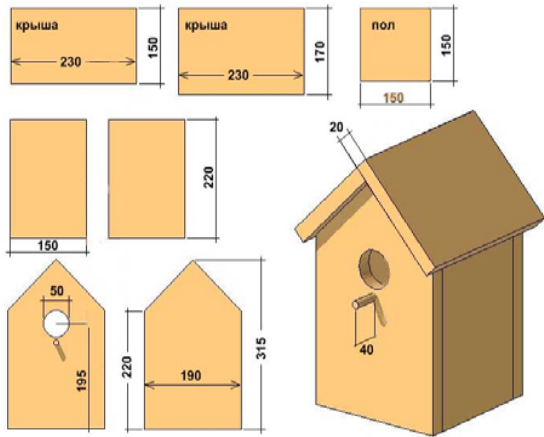


КУНЦЕВИЧ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

ФИАН, Москва

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ИДЕЯ



МЕТОД

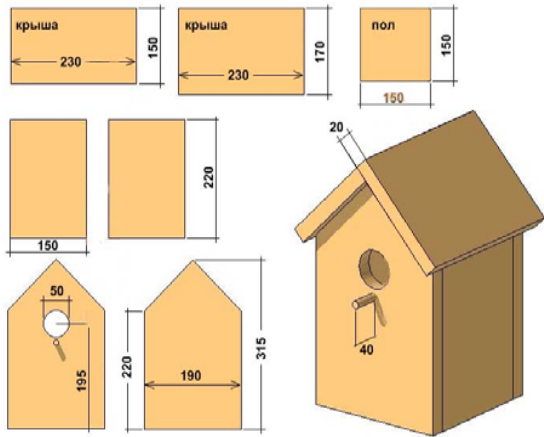


ОБЪЕКТ  
(ОБРАЗЕЦ)



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ИДЕЯ



МЕТОД



ОБЪЕКТ  
(ОБРАЗЕЦ)

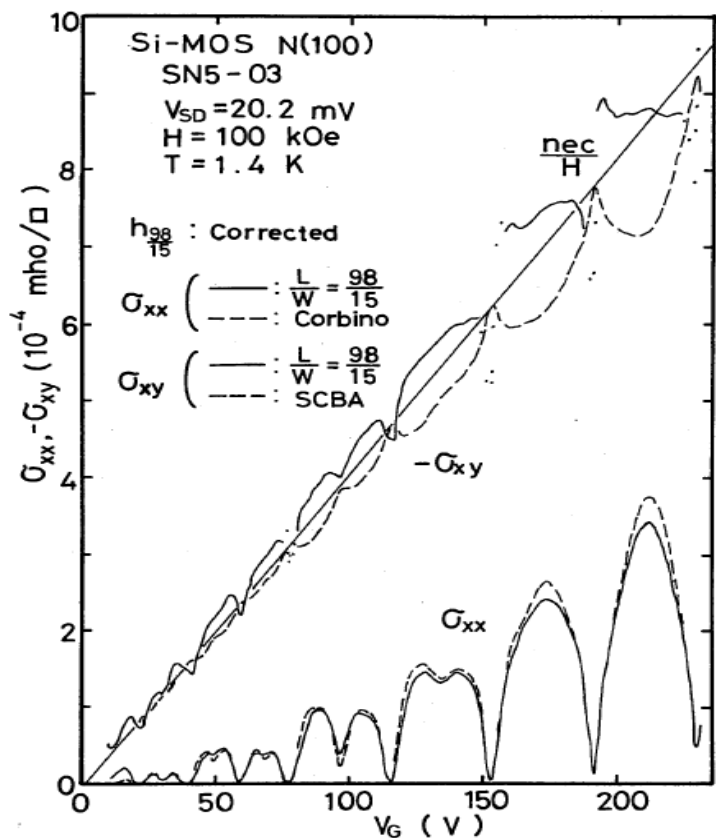


# КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN, Vol. 44, No. 6, JUNE, 1978

## Hall Effect in Silicon MOS Inversion Layers under Strong Magnetic Fields

Jun-ichi WAKABAYASHI and Shinji KAWAJI



**ВСЁ НАБЛЮДАЛОСЬ  
ДО ФОН КЛИТЦИНГА,  
И ОБРАЗЦЫ И  
МЕТОДИКИ БЫЛИ!!!**

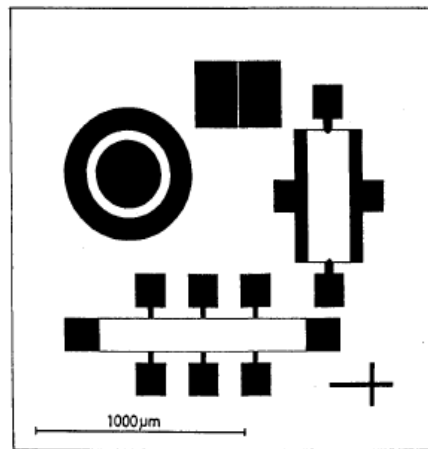
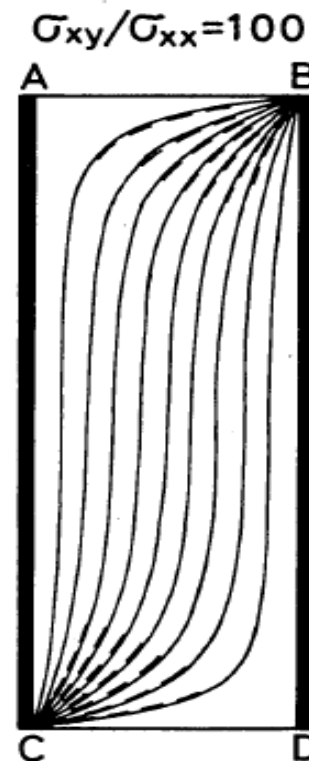
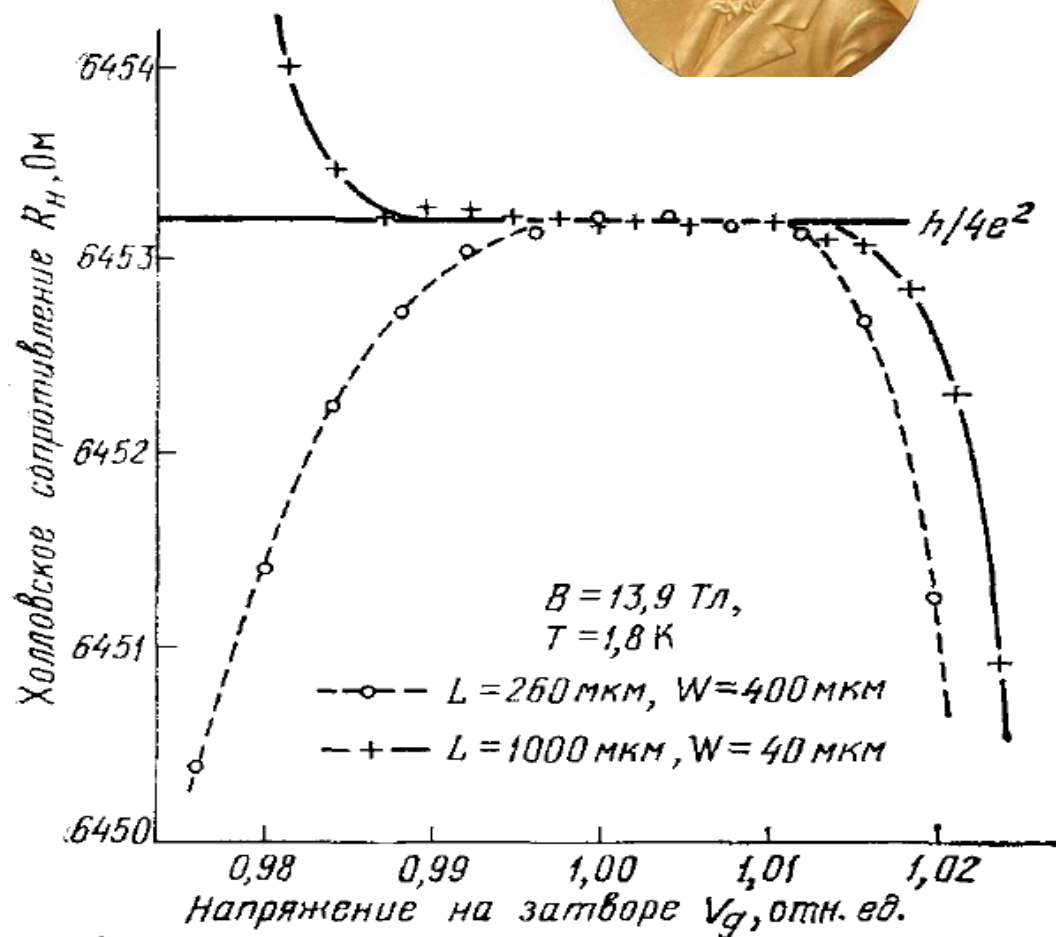
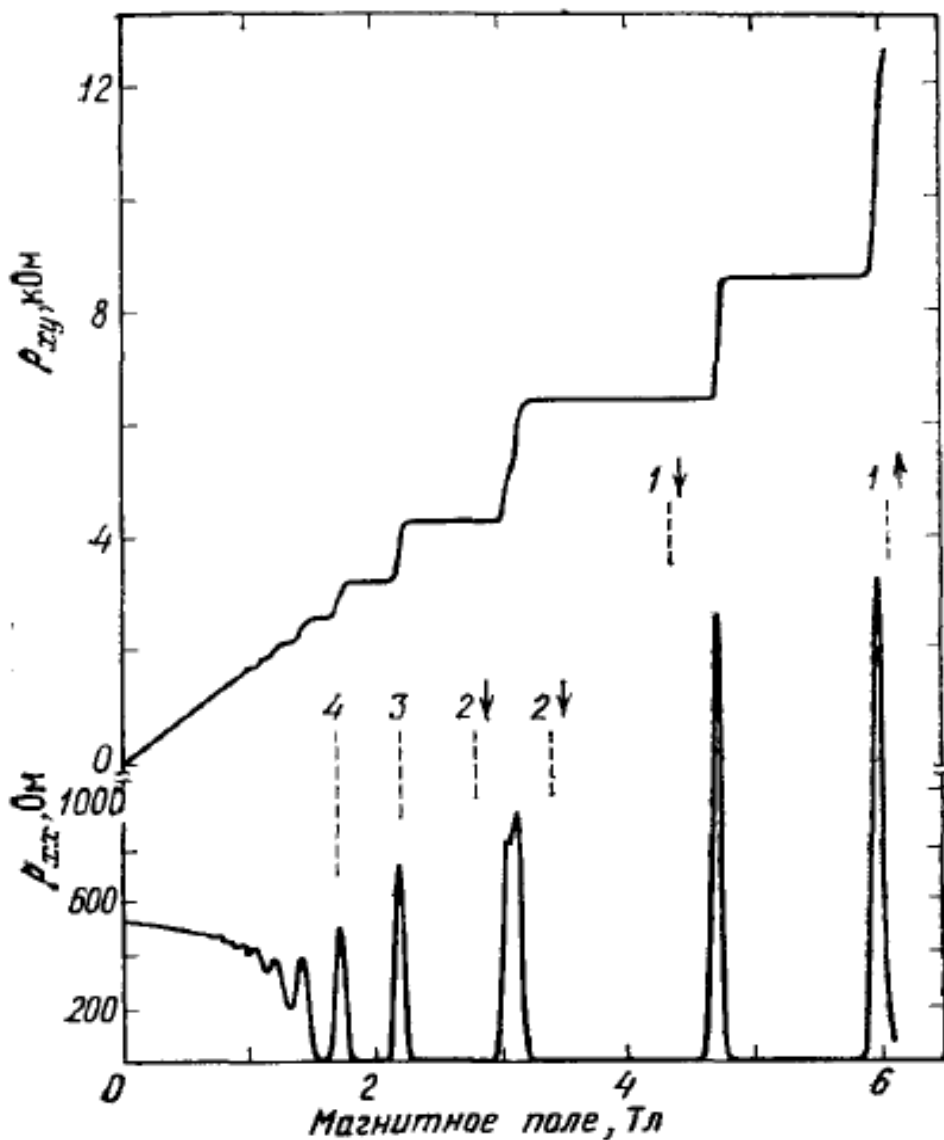


Fig. 5. Sample geometries.



# Фон Клифтинг, 1981 г



# К объяснению квантового эффекта Холла

В большом магнитном поле импульс не является приемлемым квантовым числом:

$$H = \frac{1}{2m}(\mathbf{p} + e\mathbf{A})^2 \quad E_n = \hbar\omega_B \left( n + \frac{1}{2} \right) \quad n \in \mathbb{N}$$

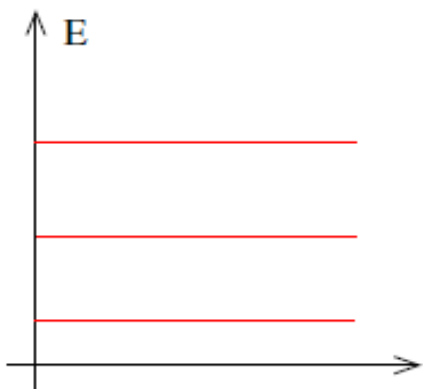


Figure 16: Density of states without disorder...

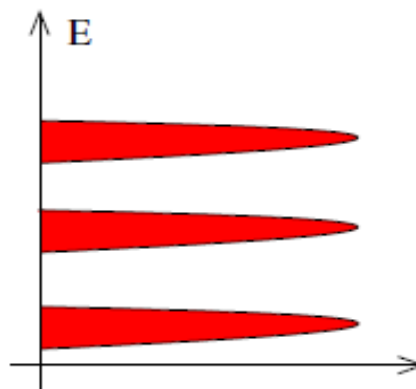
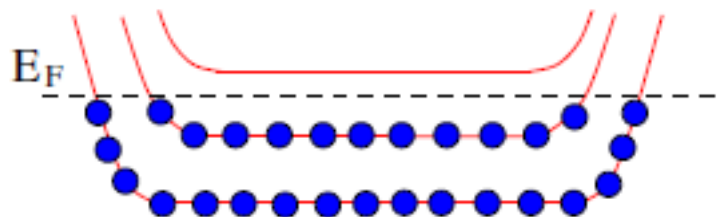
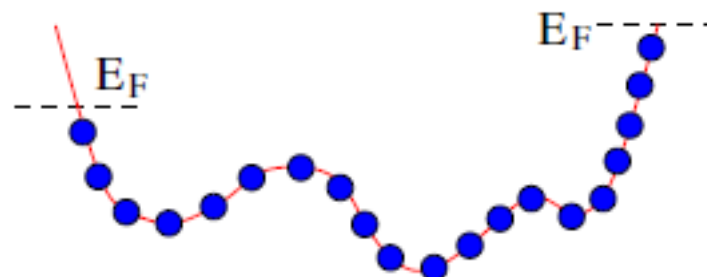


Figure 17: ...and with disorder.



ЧИСТЫЙ СЛУЧАЙ

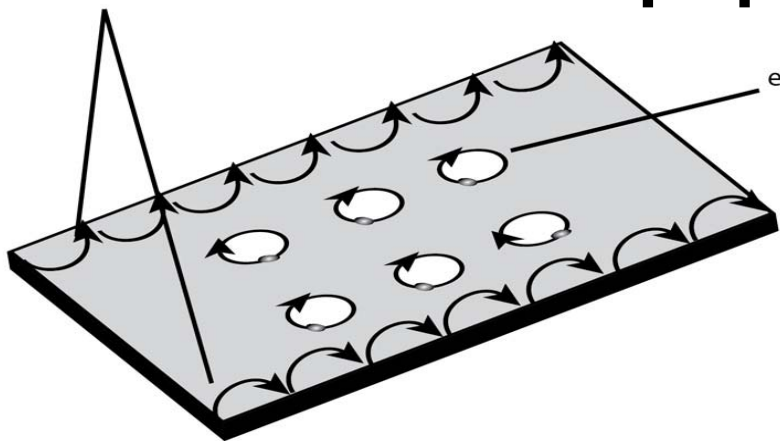


ГРЯЗНЫЙ СЛУЧАЙ

# К объяснению квантового эффекта Холла

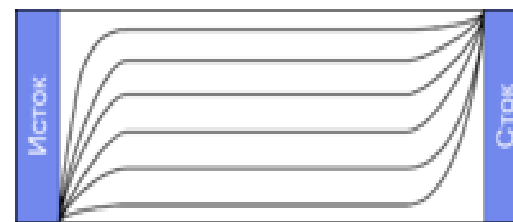
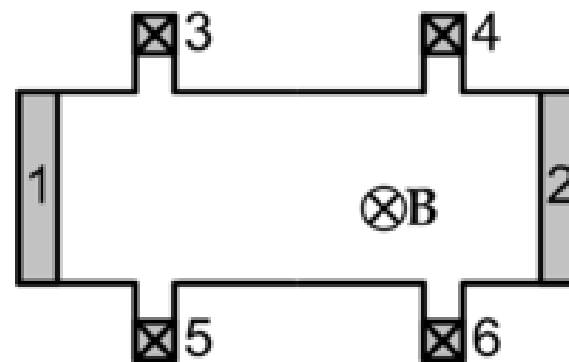
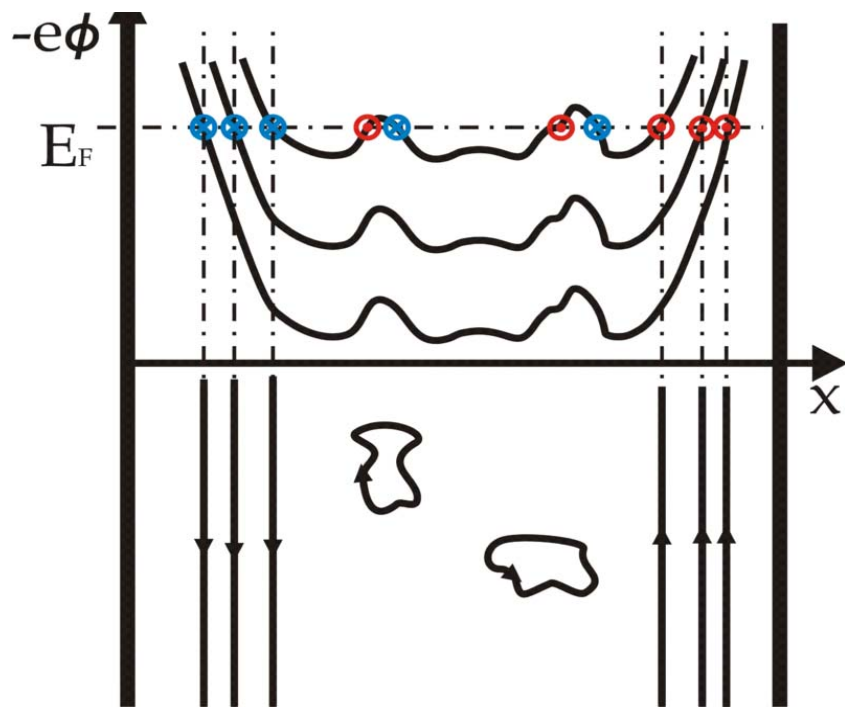
electrons can move along edge (conducting)

electrons localized in orbits (insulating)



$$\rho_{xy} = \frac{2\pi\hbar}{e^2} \frac{1}{\nu} \quad \nu \in \mathbb{Z}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho_{xx}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2} \quad \text{and} \quad \sigma_{xy} = \frac{-\rho_{xy}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2}$$





# Пример 2: Переход металл-изолятор

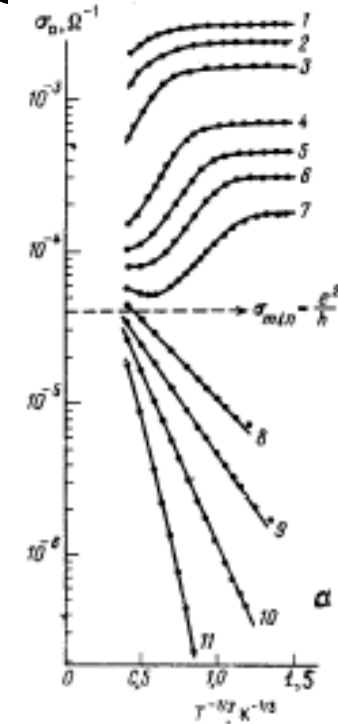
Письма в ЖЭТФ, том 45, вып. 10, стр. 476 – 480

25 мая 1987г.

## ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК В ИНВЕРСИОННЫХ КАНАЛАХ КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУР

Т.Н.Заварицкая, Э.И.Заварицкая

В интервале температур  $0,5 \leq T \leq 15$  К изучена электропроводность кремниевых инверсионных каналов с высокой подвижностью носителей. Результаты измерений согласуются с концепцией Мотта<sup>1</sup> о существовании граничного значения,  $\sigma_{min} \simeq e^2/h$ , разделяющего 2D-проводники на диэлектрики и металлы.



PHYSICAL REVIEW B

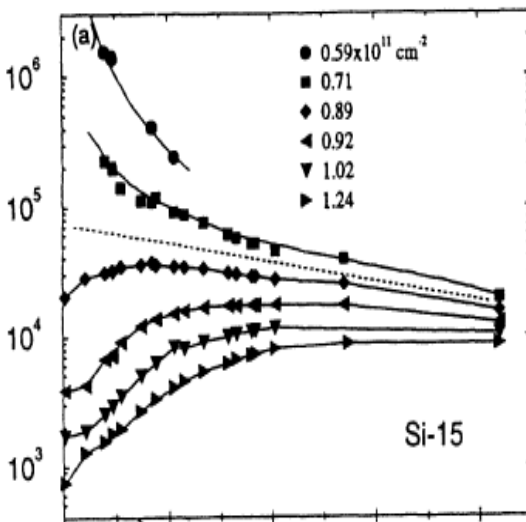
VOLUME 50, NUMBER 11

15 SEPTEMBER 1994-I

### Possible metal-insulator transition at $B = 0$ in two dimensions

S. V. Kravchenko, G. V. Kravchenko,\* and J. E. Furneaux V. M. Pudalov† and M. D'Iorio

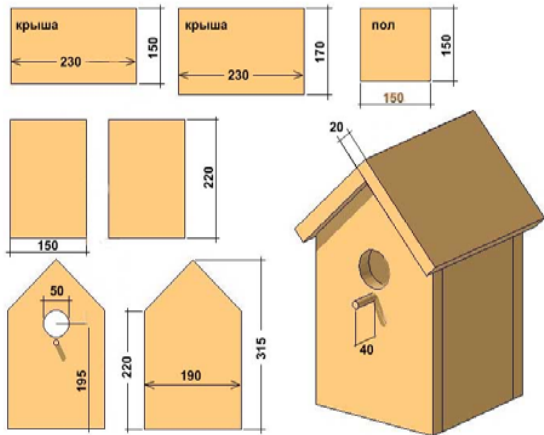
We have studied the zero magnetic field resistivity  $\rho$  of unique high-mobility two-dimensional electron systems in silicon. At very low electron density  $n_s$  (but higher than some sample-dependent critical value  $n_{cr} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ), conventional weak localization is overpowered by a sharp drop of  $\rho$  by an order of magnitude with decreasing temperature below  $\sim 1-2$  K. No further evidence for electron localization is seen down to at least 20 mK. For  $n_s < n_{cr}$ , the sample is insulating. The resistance is empirically found to scale with temperature both below and above  $n_{cr}$  with a single parameter that approaches zero at  $n_s = n_{cr}$  suggesting a metal-insulator phase transition.





# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ИДЕЯ



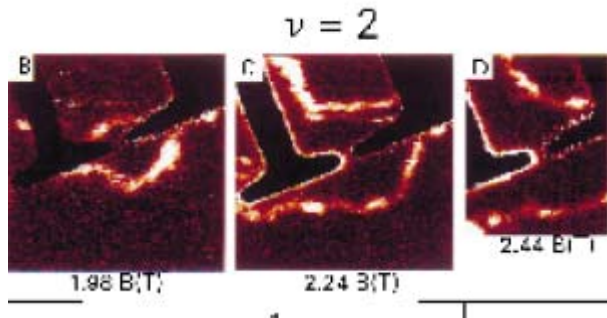
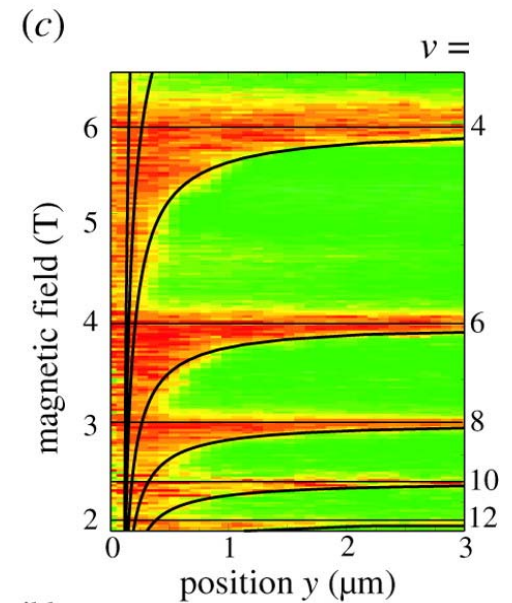
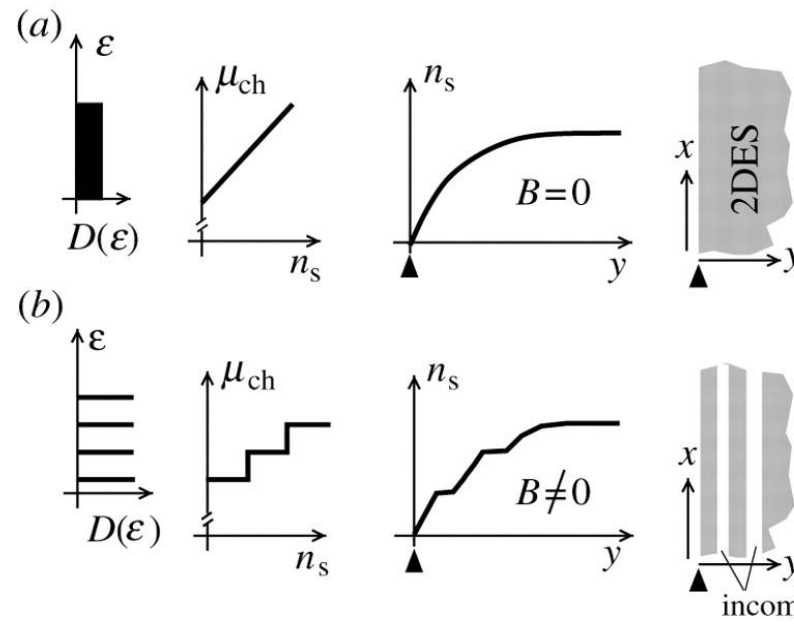
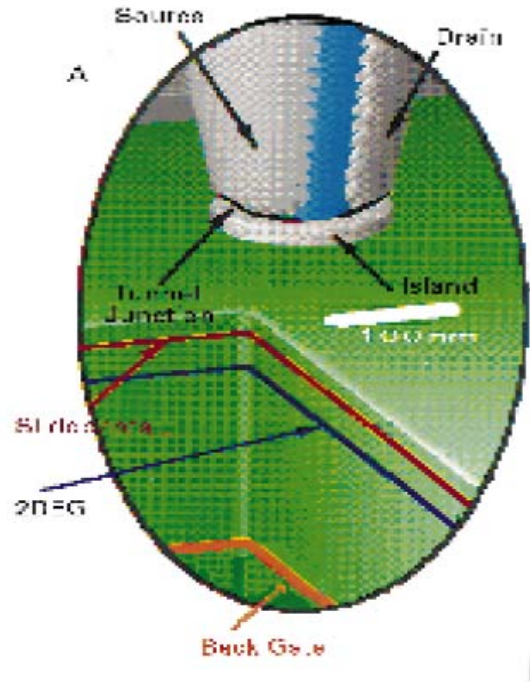
МЕТОД



ОБЪЕКТ  
(ОБРАЗЕЦ)



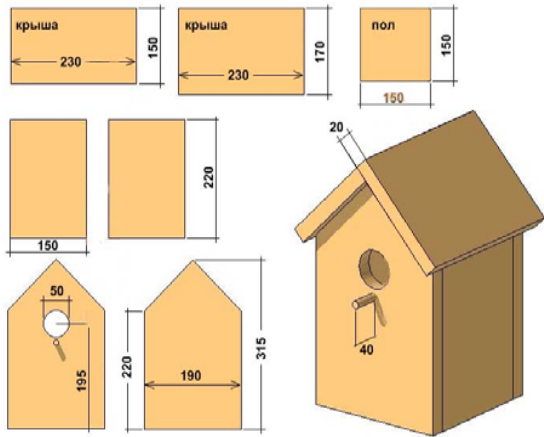
# Пример: визуализация несжимаемых полосок в режиме КЭХ



A. Yacoby, H.F. Hess, T.A. Fulton, L.N. Pfeiffer, K.W. West; Solid State Communications **111** (1999) 1–13

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ИДЕЯ



МЕТОД



ОБЪЕКТ  
(ОБРАЗЕЦ)



# ОБРАЗЦЫ

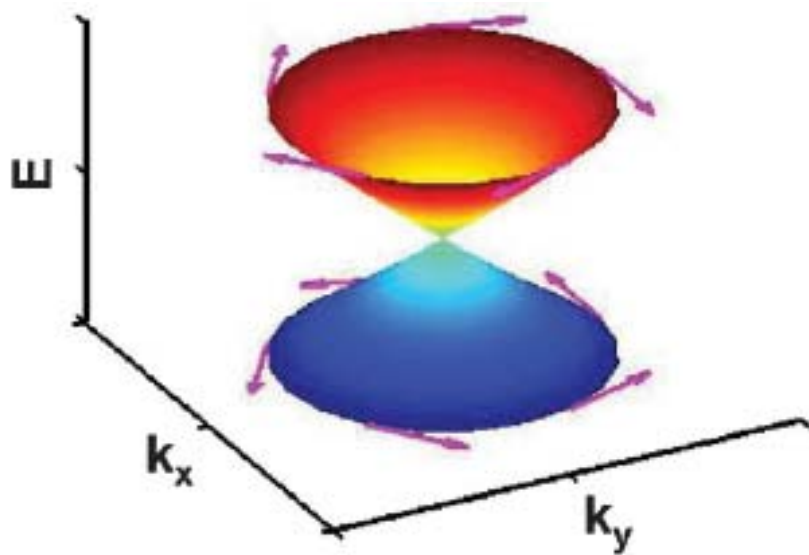
КРИСТАЛЛЫ

ПЛЕНКИ

МИКРО и НАНОСТРУКТУРЫ

СТРУКТУРА-> СПЕКТР->СВОЙСТВА

# ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ



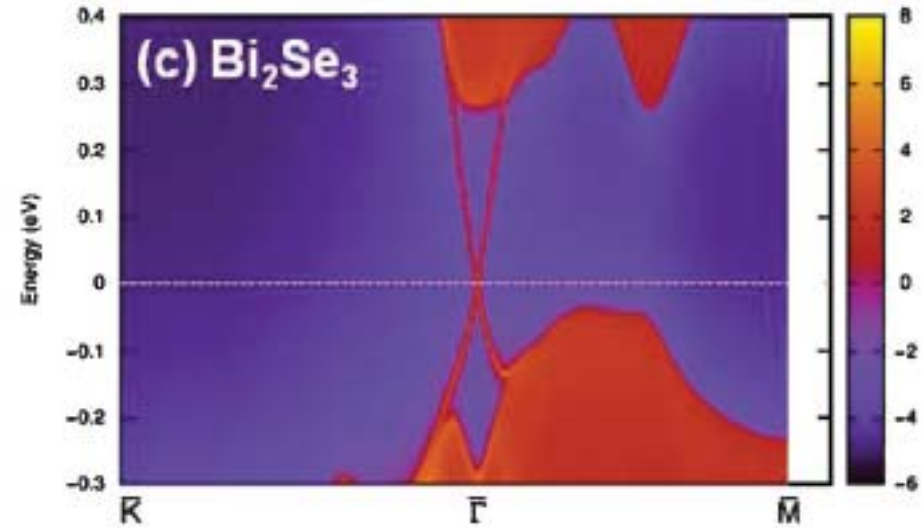
$$\mathbf{j}(\mathbf{x}) = v[\psi^\dagger(\mathbf{x})\boldsymbol{\sigma}\psi(\mathbf{x}) \times \hat{\mathbf{z}}] = v\mathbf{S}(\mathbf{x}) \times \hat{\mathbf{z}}.$$

Backscattering is prohibited

Topological magnetoelectric effect

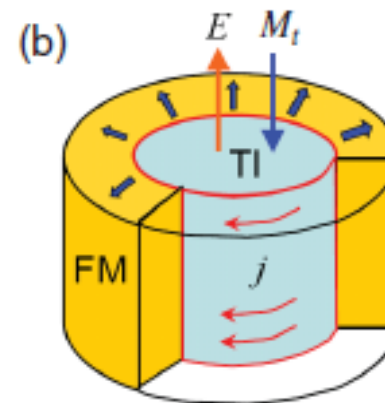
$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M} + 2P_3\alpha\mathbf{E},$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} - 2P_3\alpha\mathbf{B},$$



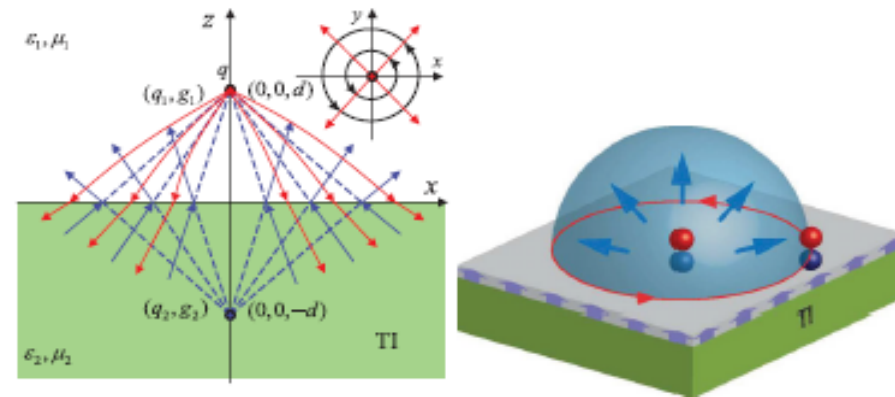
Zhang, H., C.-X. Liu, X.-L. Qi, X. Dai, Z. Fang, and S.-C. Zhang, 2009, *Nature Phys.* 5, 438.

Current Flow => Spin polarization



# СВОЙСТВА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

Possible observation of image  
magnetic monopole  
(not observed yet)





# Волны Блоха: решения УШ для периодического потенциала

## Bloch waves

Bloch's theorem:

Solutions of the Schrodinger equation

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + \hat{V}(\mathbf{r}) \right) \Psi_k(\mathbf{r}) = \varepsilon_k \Psi_k(\mathbf{r})$$

for the wave in periodic potential  $U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}+\mathbf{R})$  are:

Bloch function:

$$\Psi_k(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} u_k(\mathbf{r})$$

Envelope part

Periodic (unit cell) part

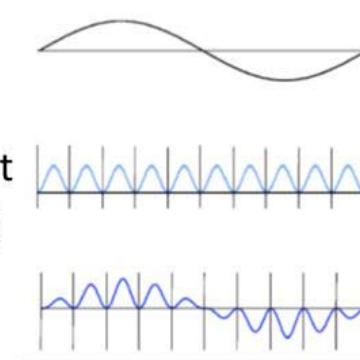
$$u_k(\mathbf{r}) = u_k(\mathbf{r} + \mathbf{R})$$



Felix Bloch  
1905, Zürich -  
1983, Zürich

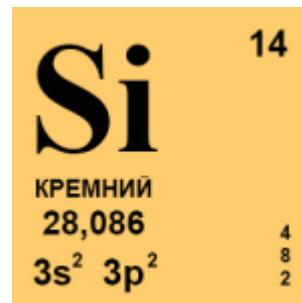


1952

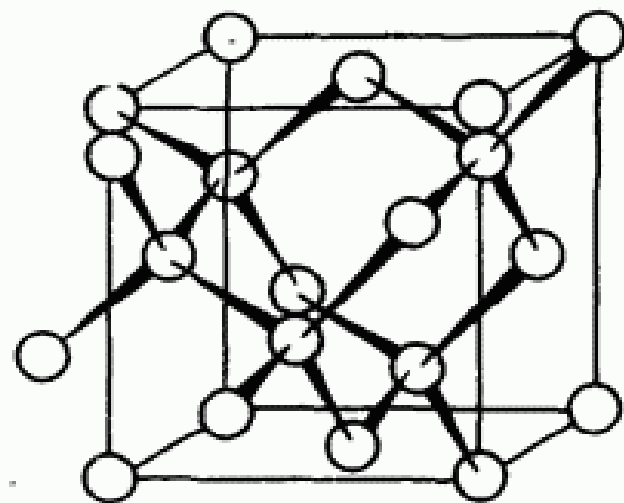
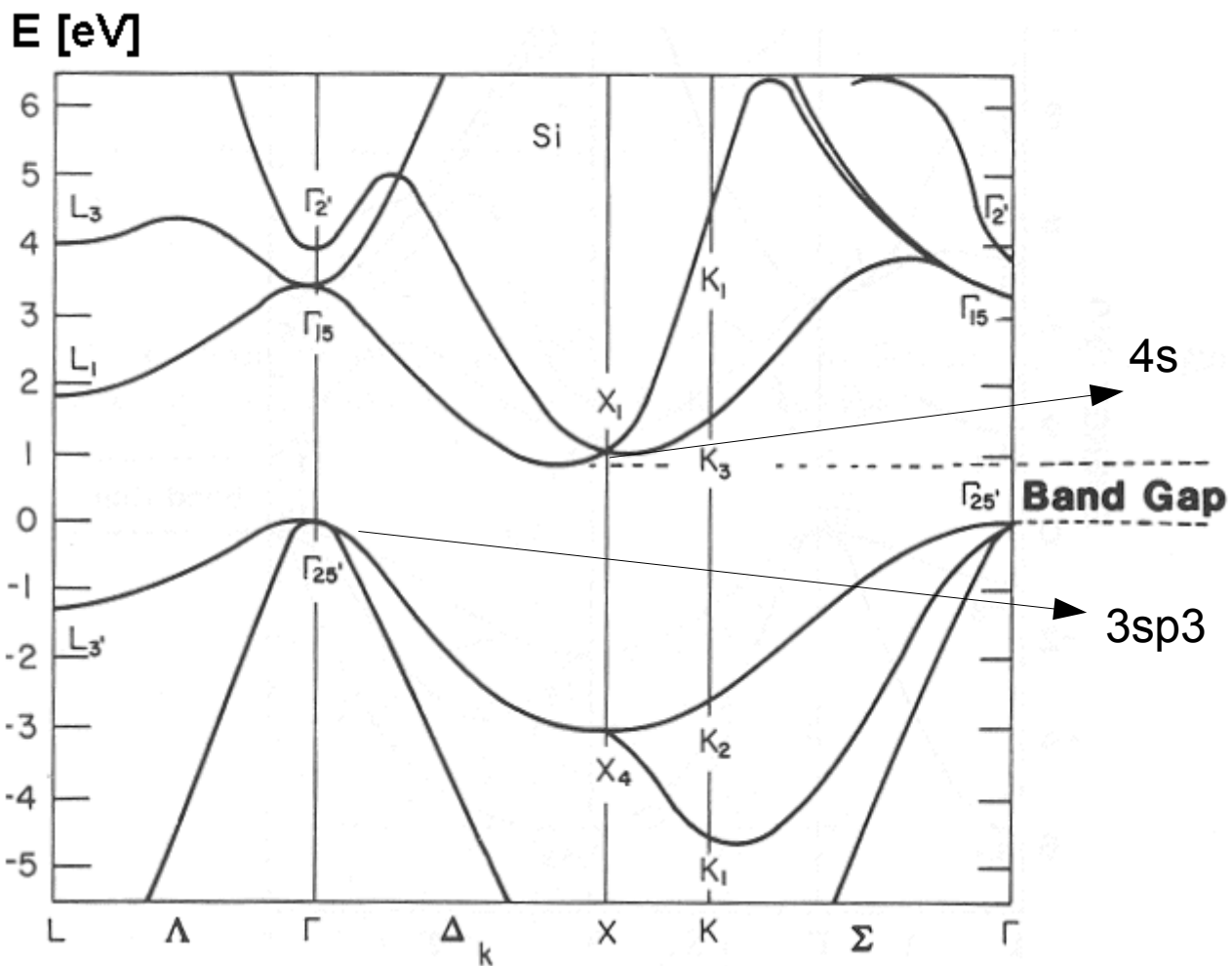




# ЗАКОН ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТТ



sp<sup>3</sup>- гибридизация



В чистом кремнии у всех атомов полностью заполнена 3 орбиталь

# МОДЕЛЬ ВОЛКОВА-ПАНКРАТОВА

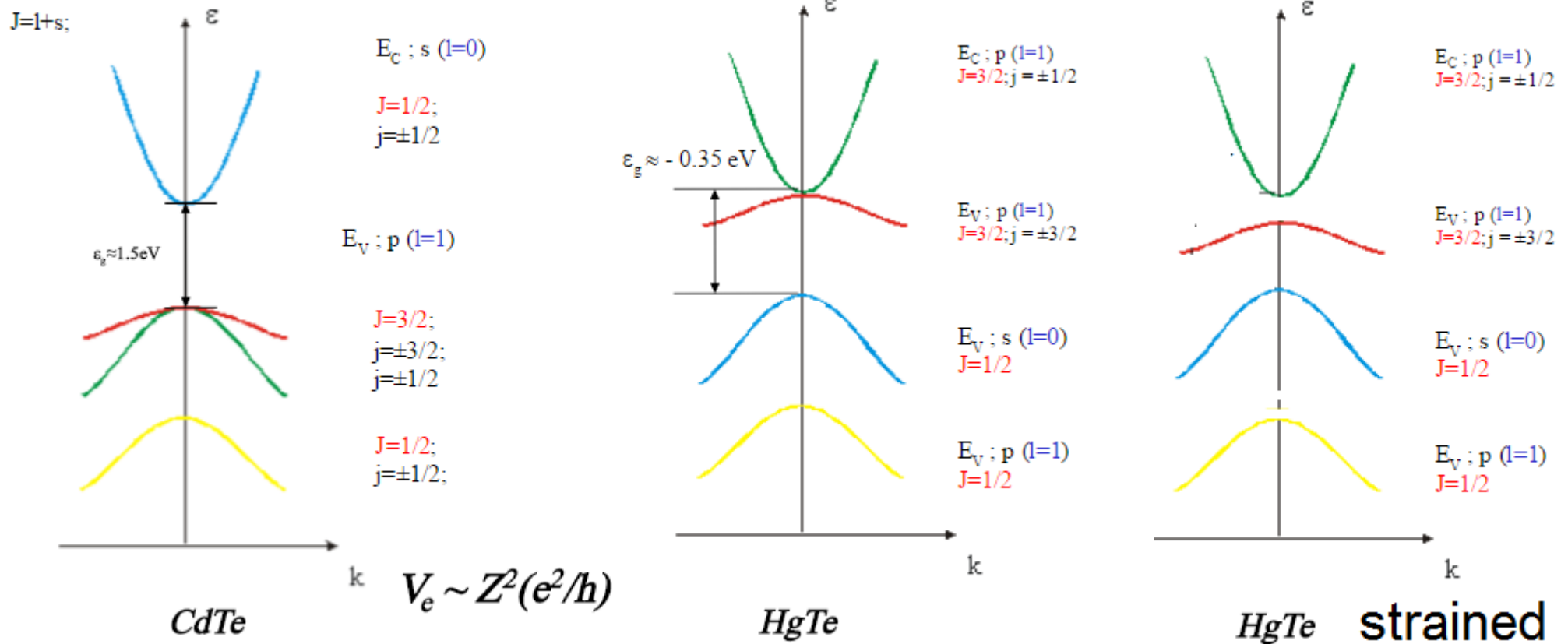
*Письма в ЖЭТФ, том 42, вып. 4, стр. 145 – 148*

*25 августа 1985 г.*

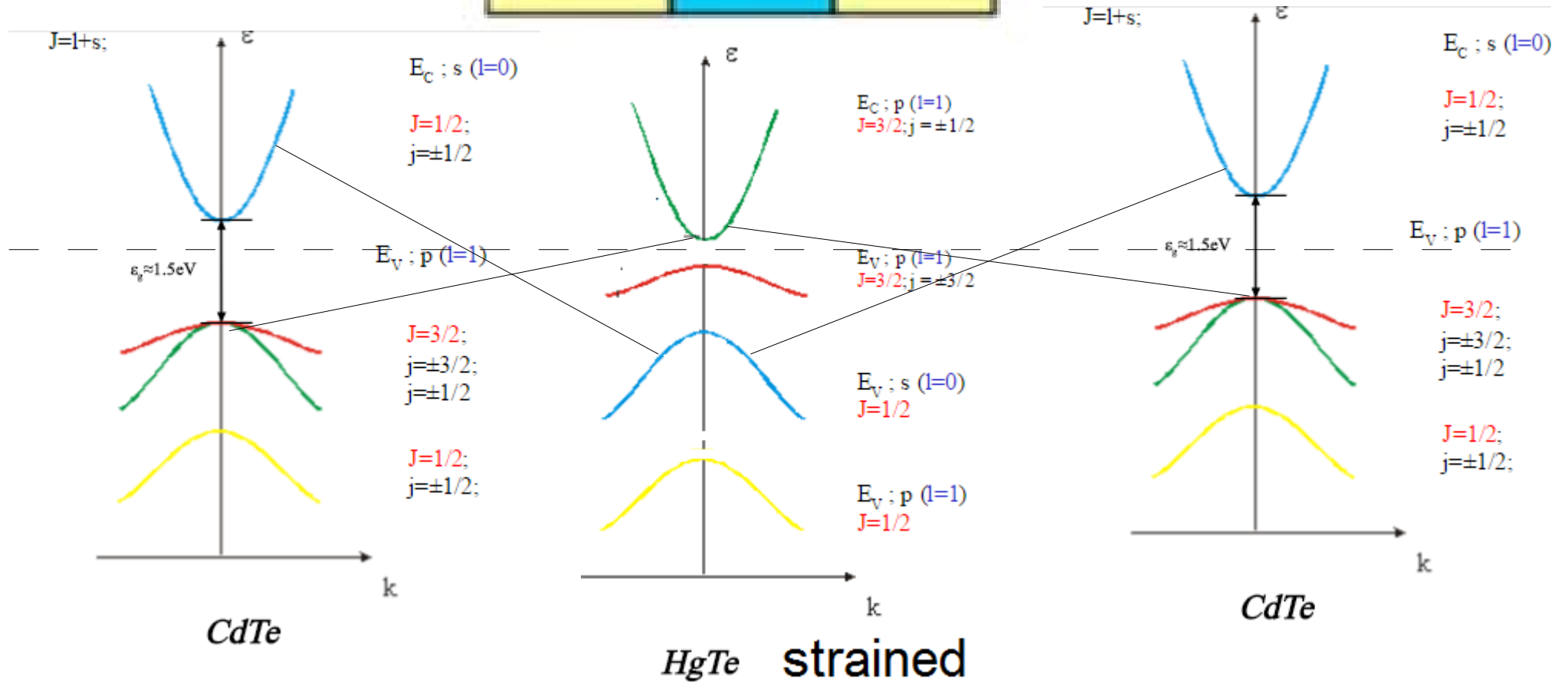
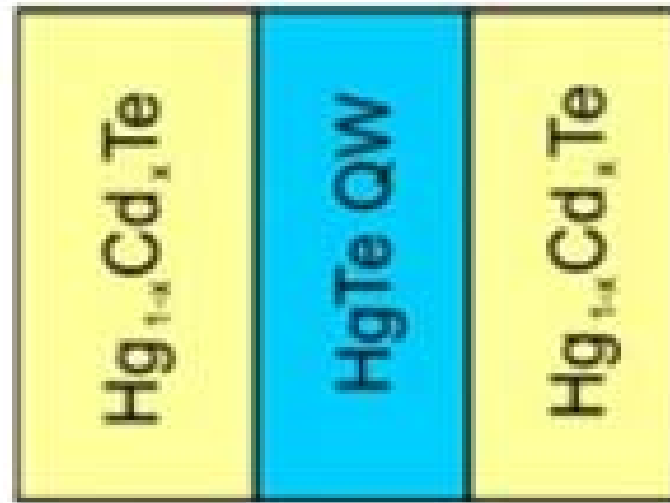
**БЕЗМАССОВЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ИНВЕРСНОМ КОНТАКТЕ**

*Б.А.Волков, О.А.Панкратов*

# СТАРТОВЫЙ МАТЕРИАЛ — УЗКОЗОННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК



ПОМЕСТИМ НАПРЯЖЕННЫЙ  
СЛОЙ HgTe между обкладок CdTe

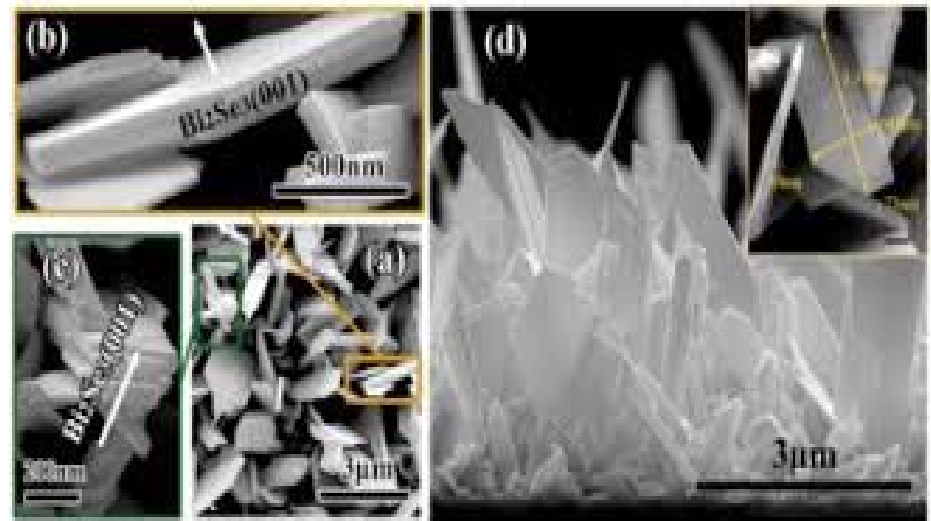
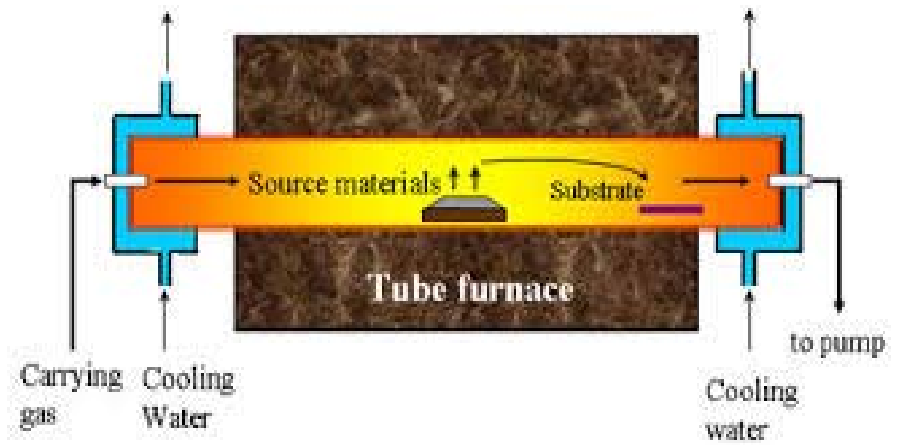
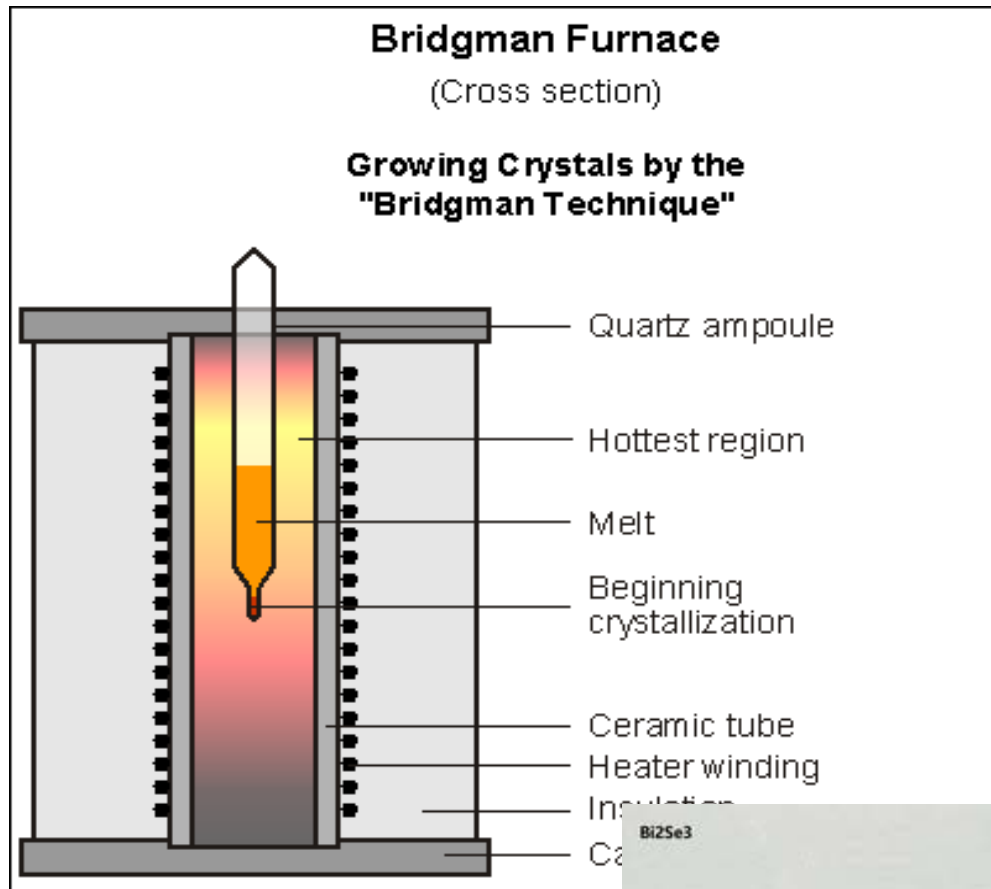


# АНАЛОГИЯ ИЗ ЖИЗНИ



# НАБЛЮДЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

# РОСТ КРИСТАЛЛОВ

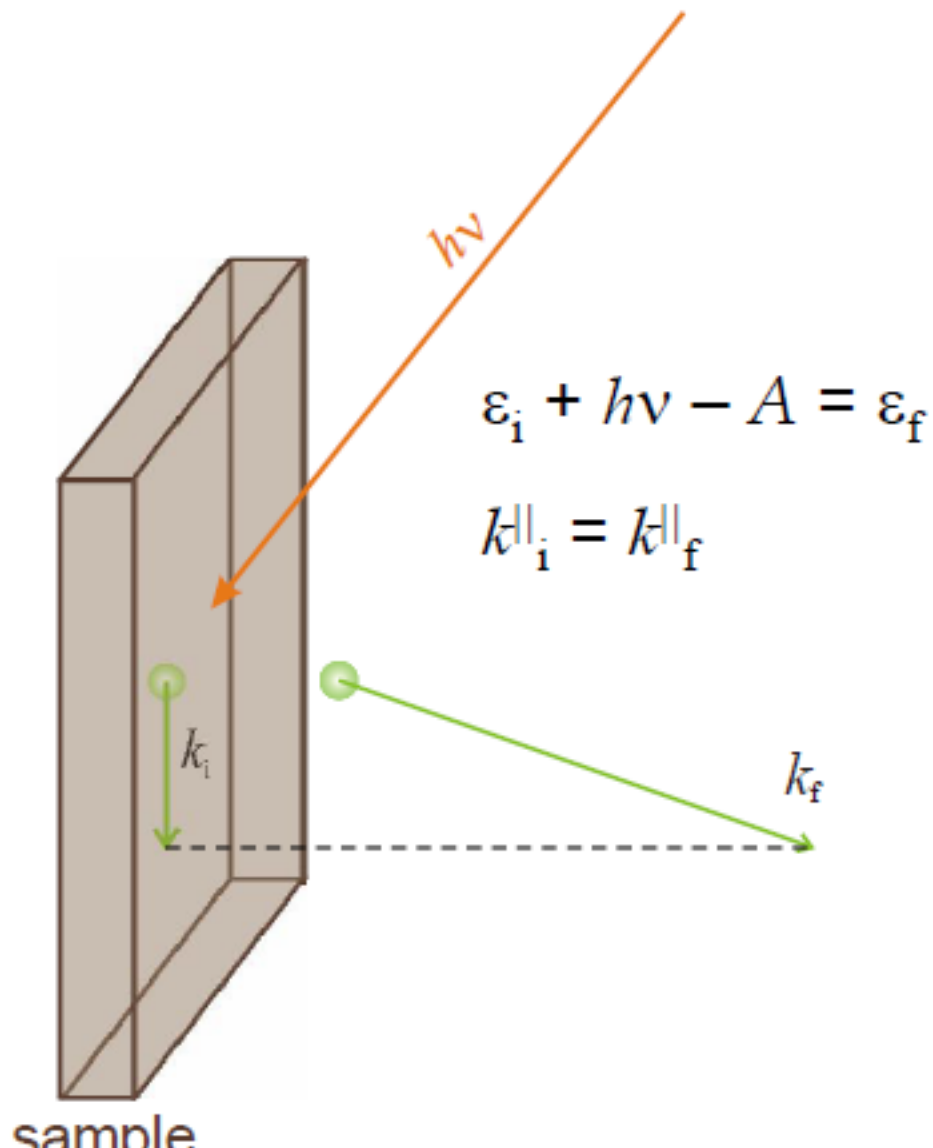


МЕТОД БРИДЖМАНА (98% работ)

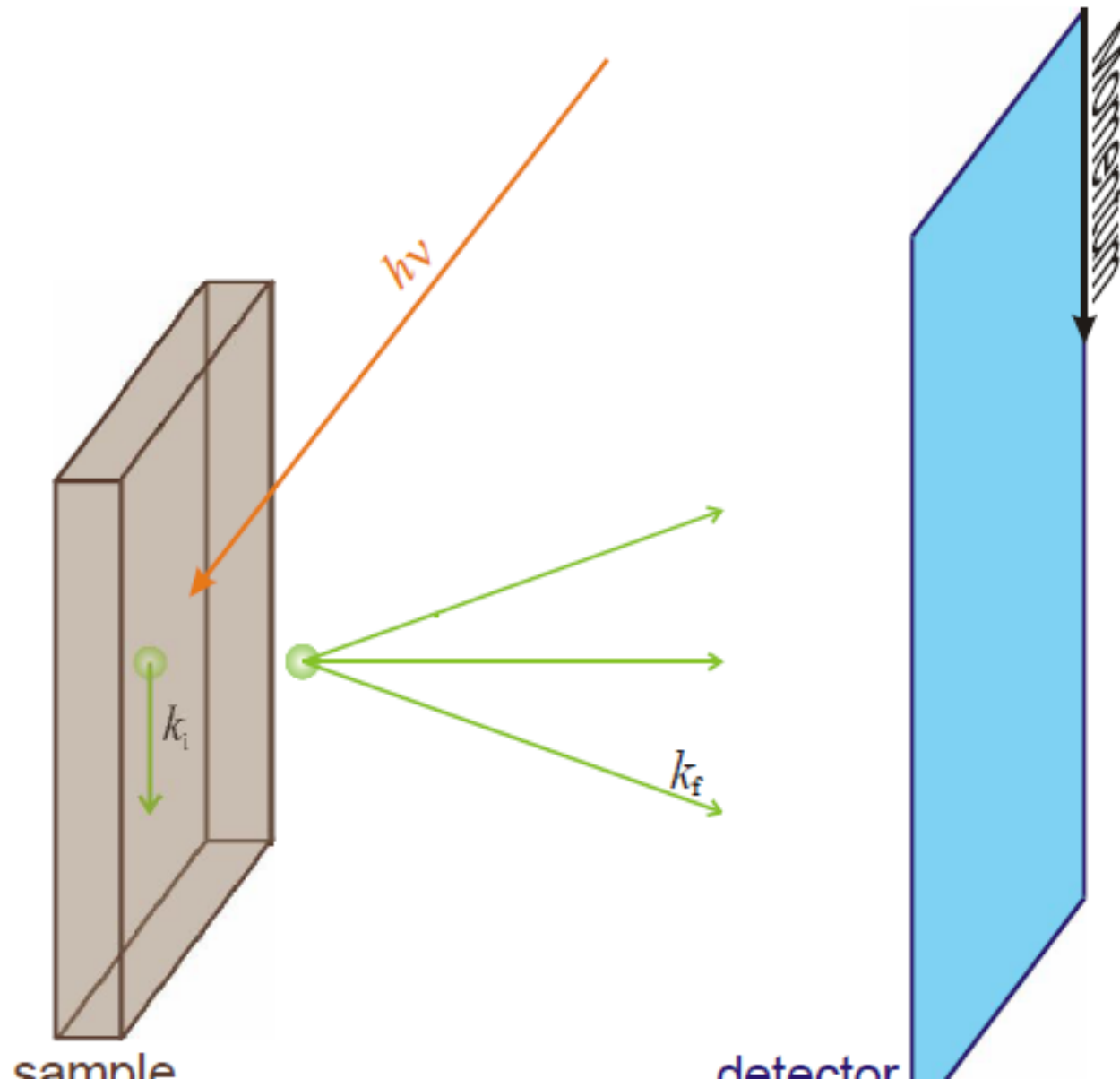
PVD



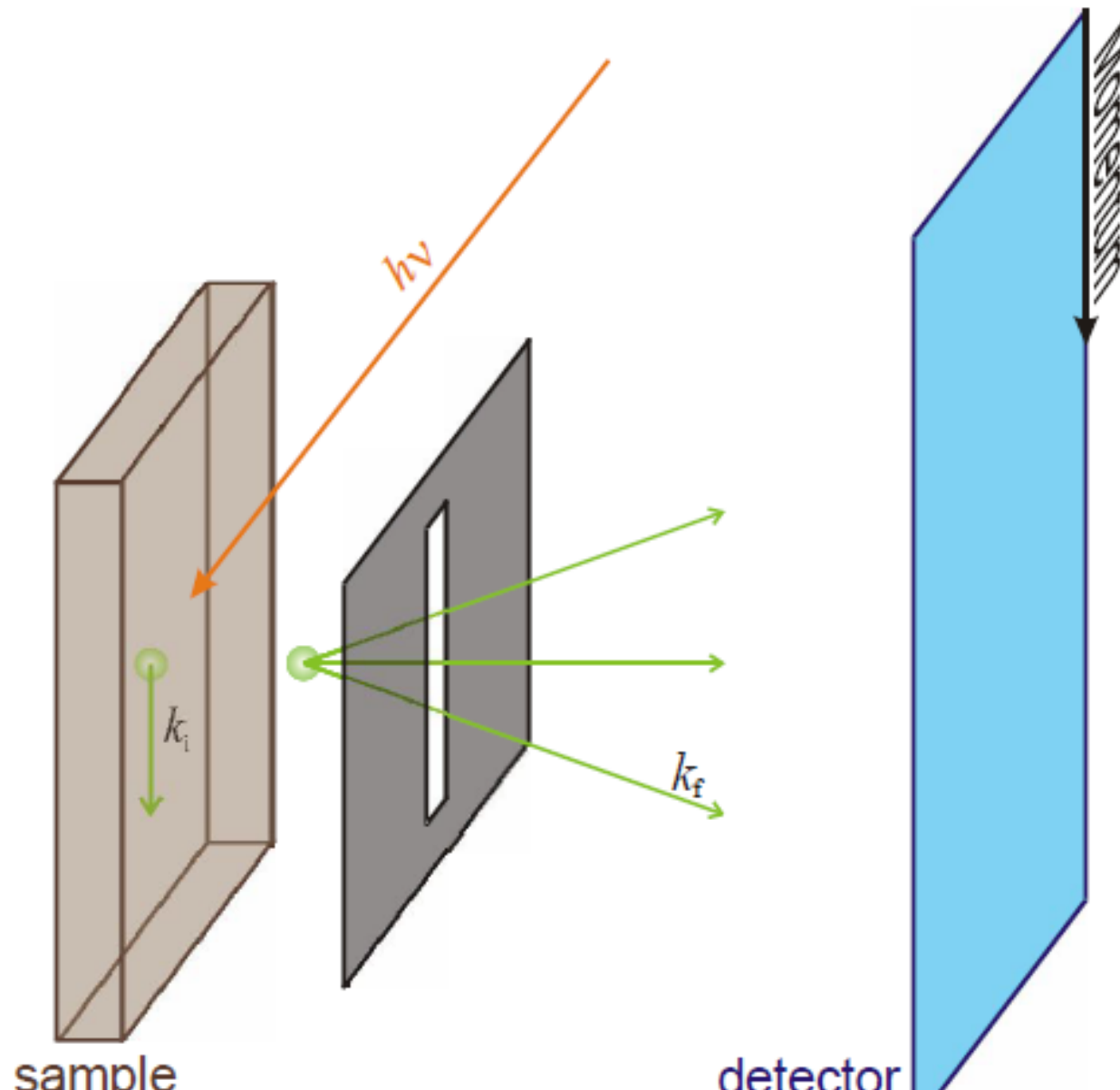
# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



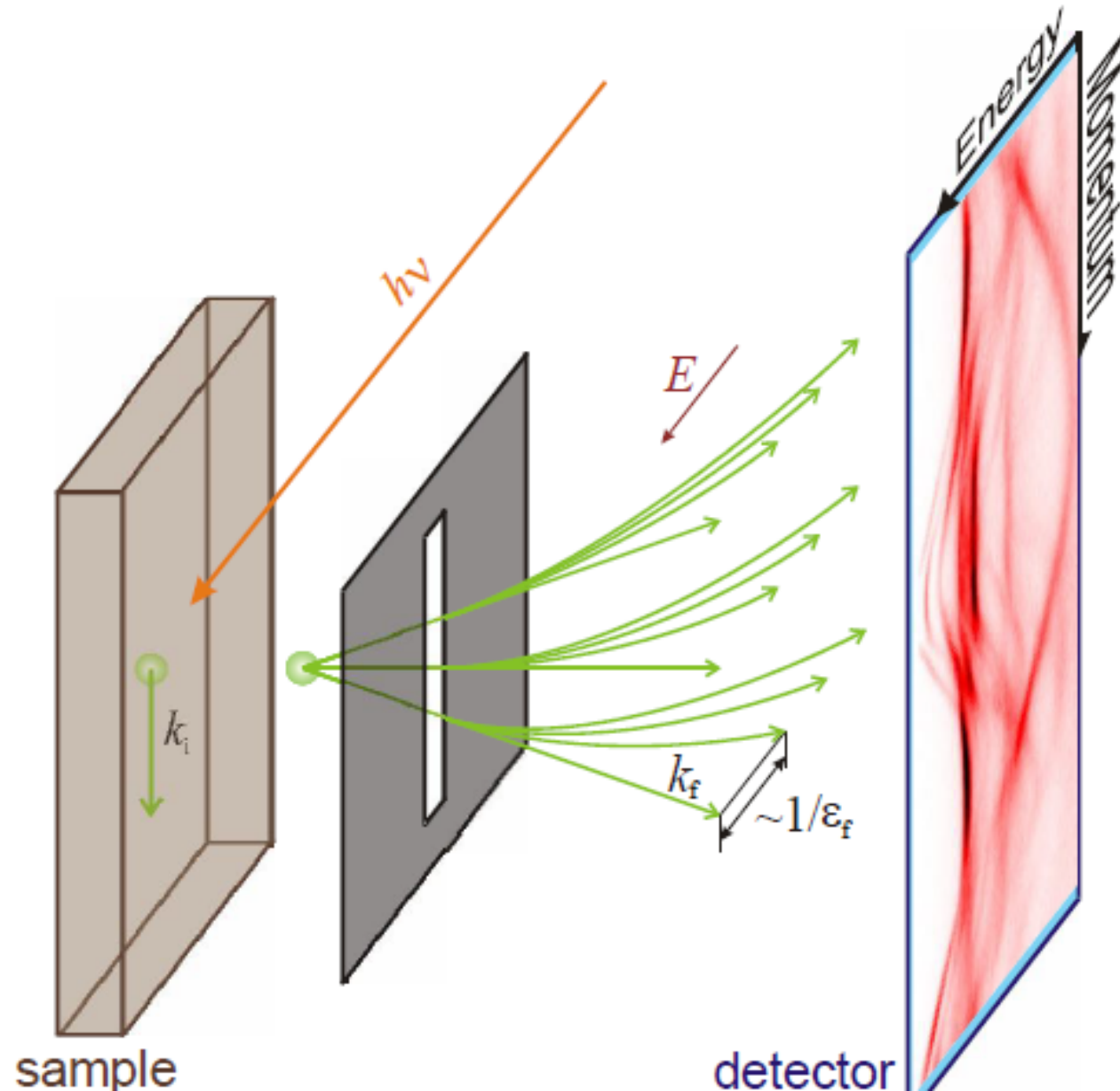
# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



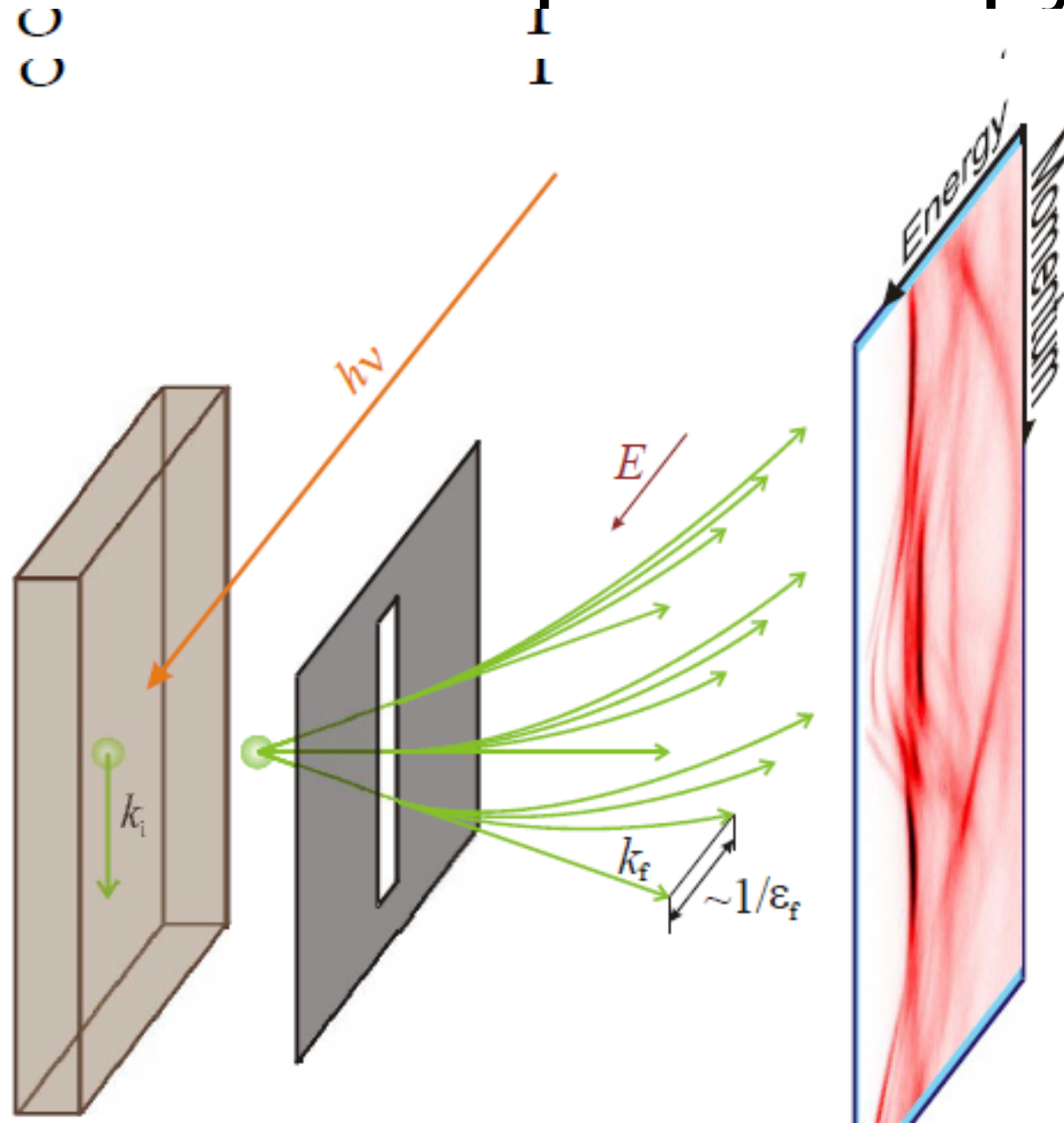
# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



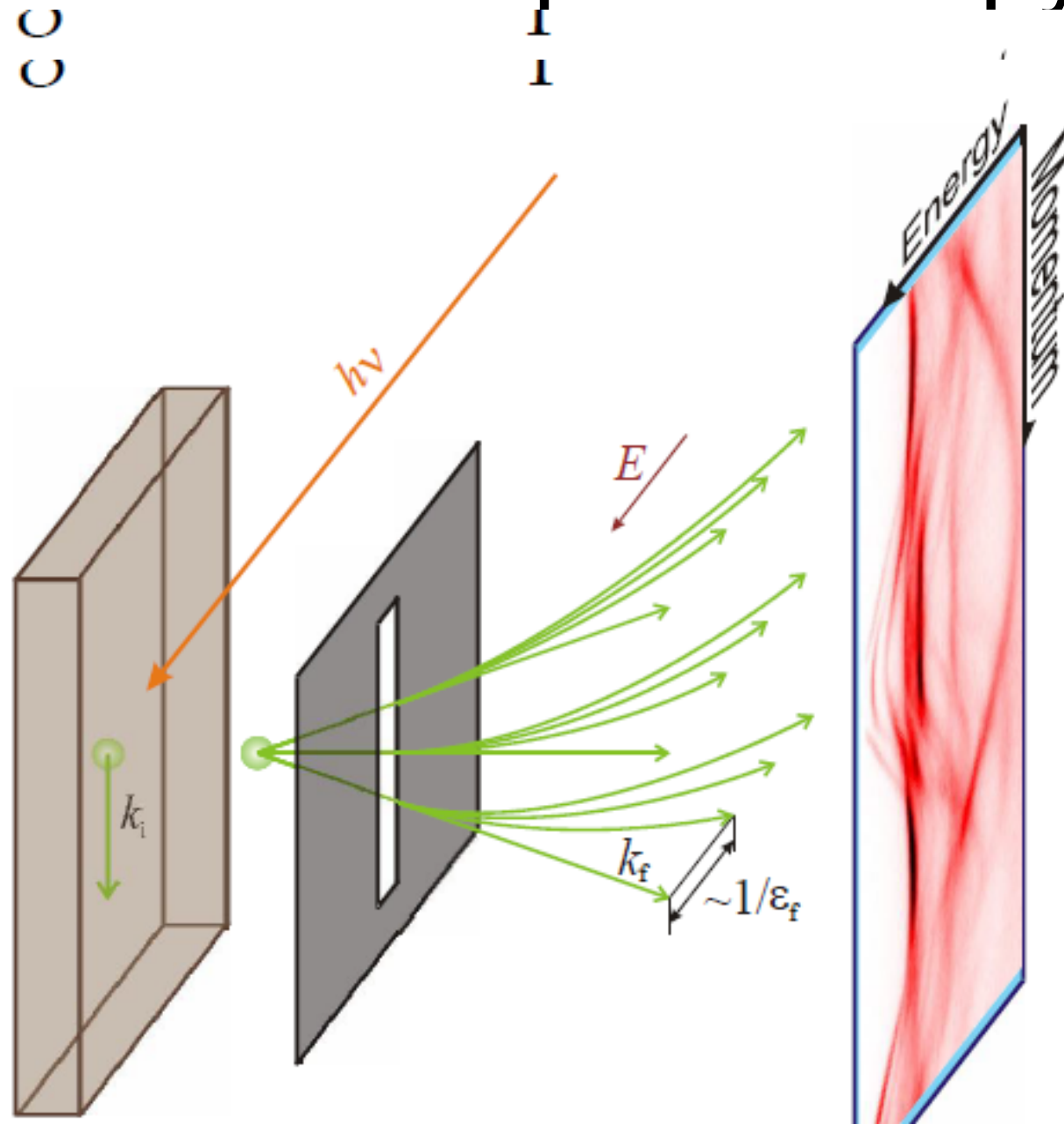
# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



# ARPES: angle resolved photoemission spectroscopy



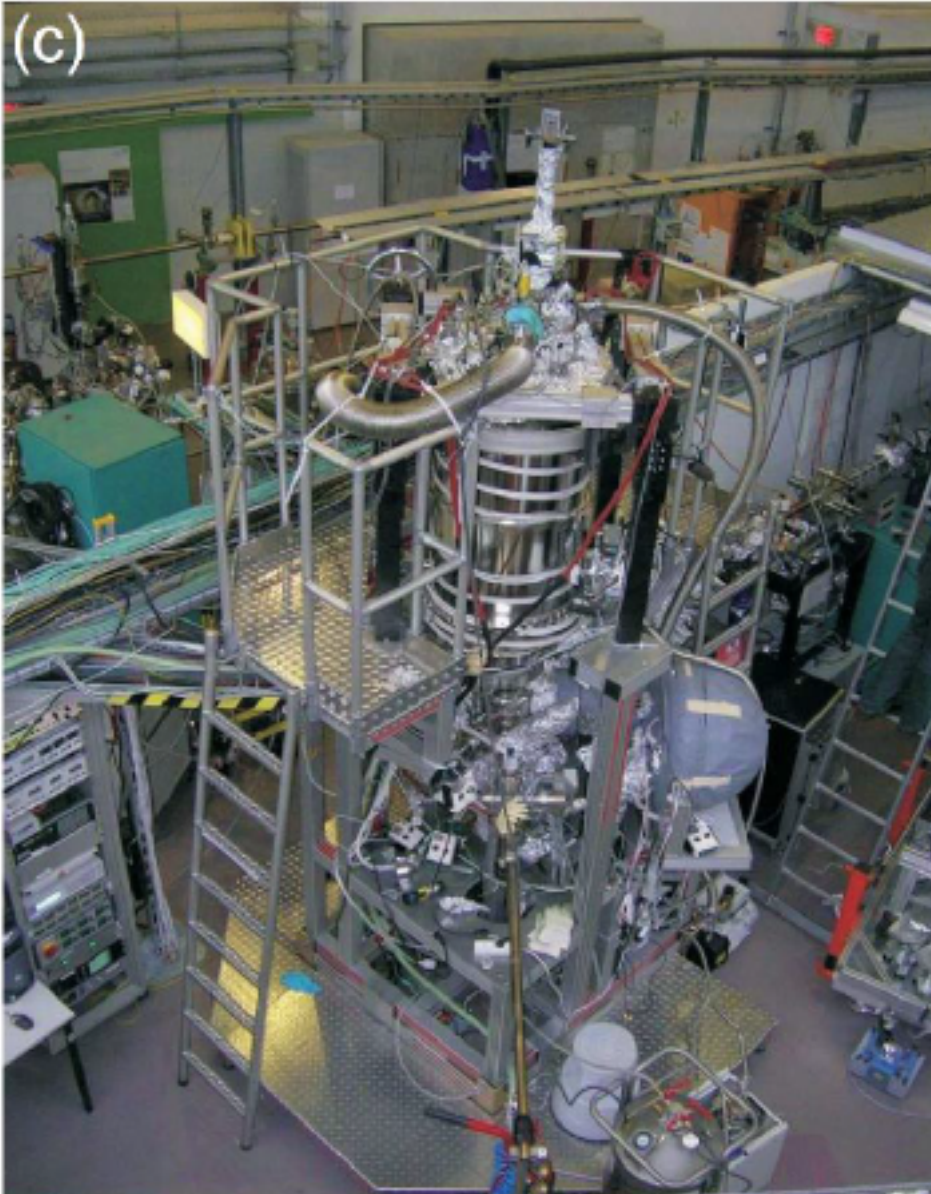


# BESSY 1<sup>3</sup> station

100 000 000 руб

В России

Владивосток, СпбГУ, ФИАН

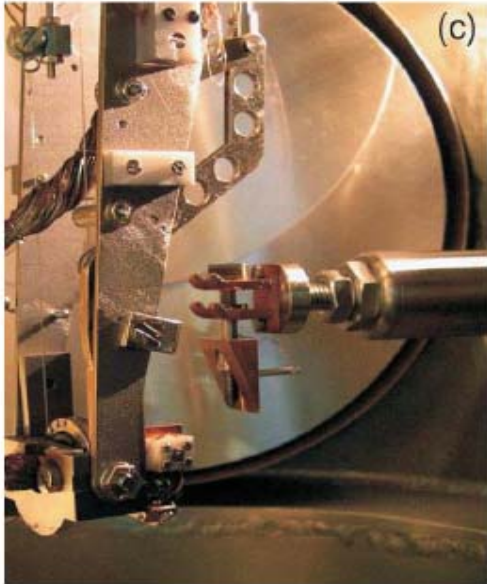
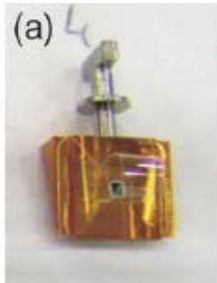




# ПОЧЕМУ ТАК ДОРОГО?

- Детектор (монополи Scienta-Omicron)
- СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ
- 5-координатный манипулятор и система передачи
- УЗКОПОЛОСНЫЙ ИСТОЧНИК (гелиевая лампа, ондулятор, лазер)
- КРИОСТАТ
- in-situ LEED, Auger, ion etching

# Scienta electron analyzer

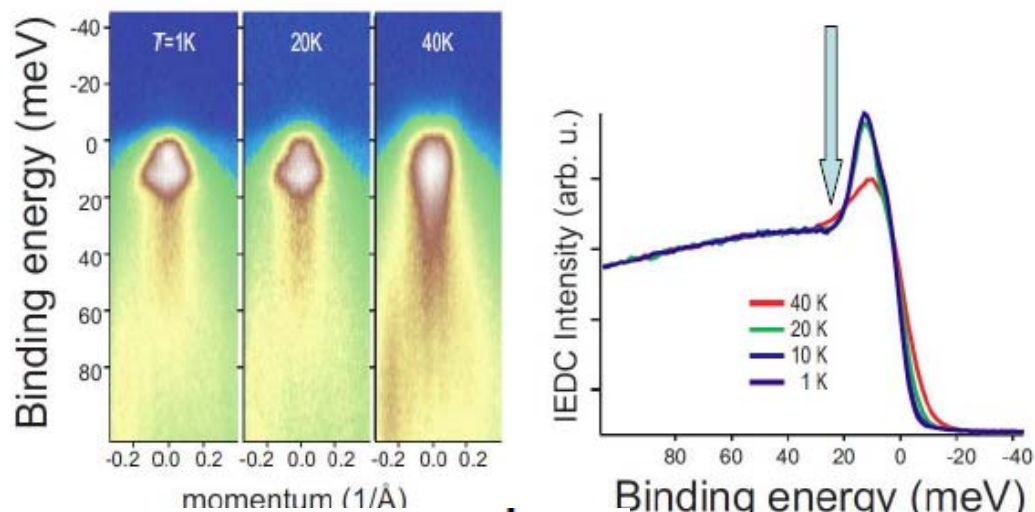
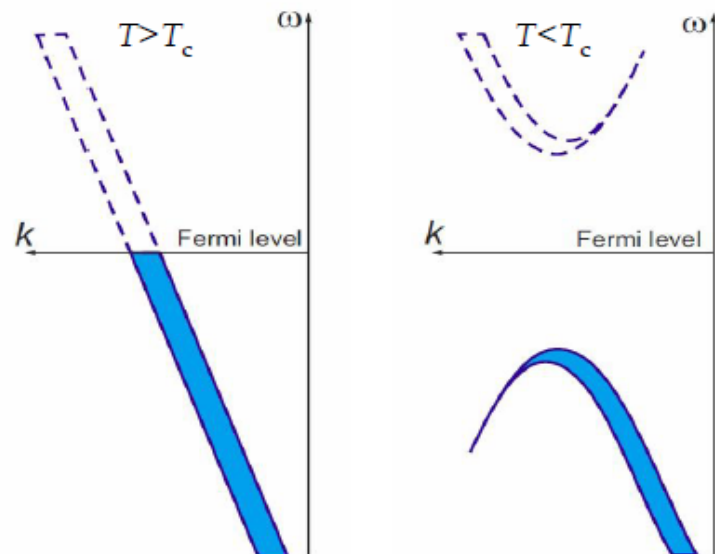


Sample Holder

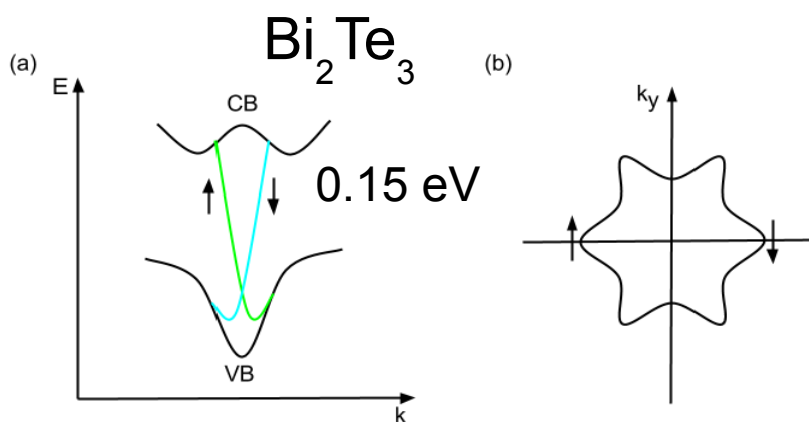
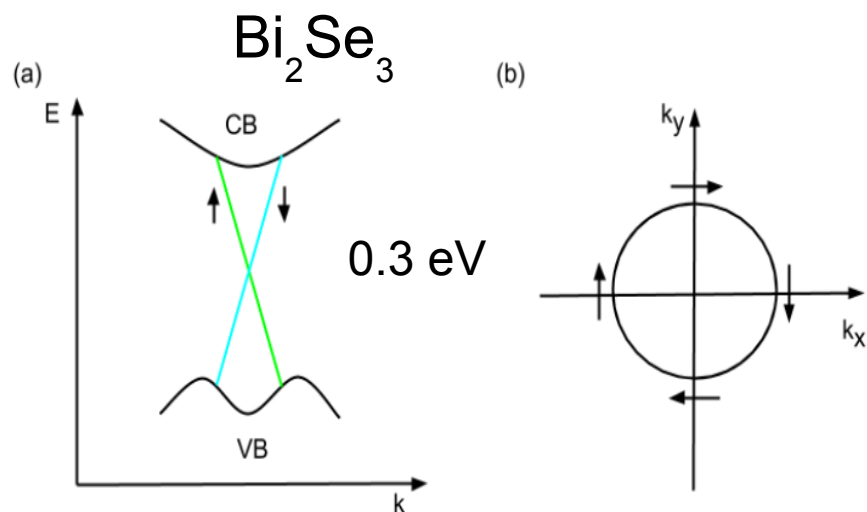
# ТОЧНОСТЬ ARPES

- монохроматичность линии
- угол расхождения света
- качество кристалла, плоскость
- чувствительность к внешним магнитным полям
- все поглощение – вблизи поверхности =>
- чувствительность к реконструкции, адсорбции...

1 meV

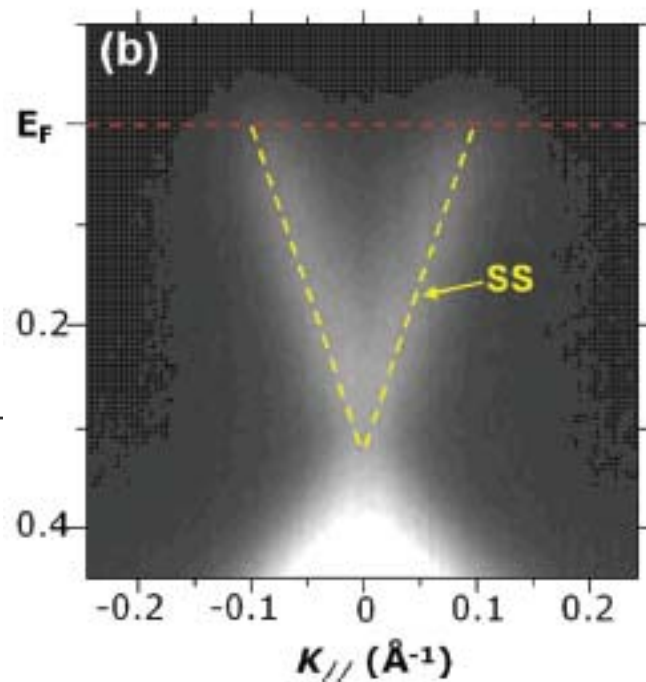
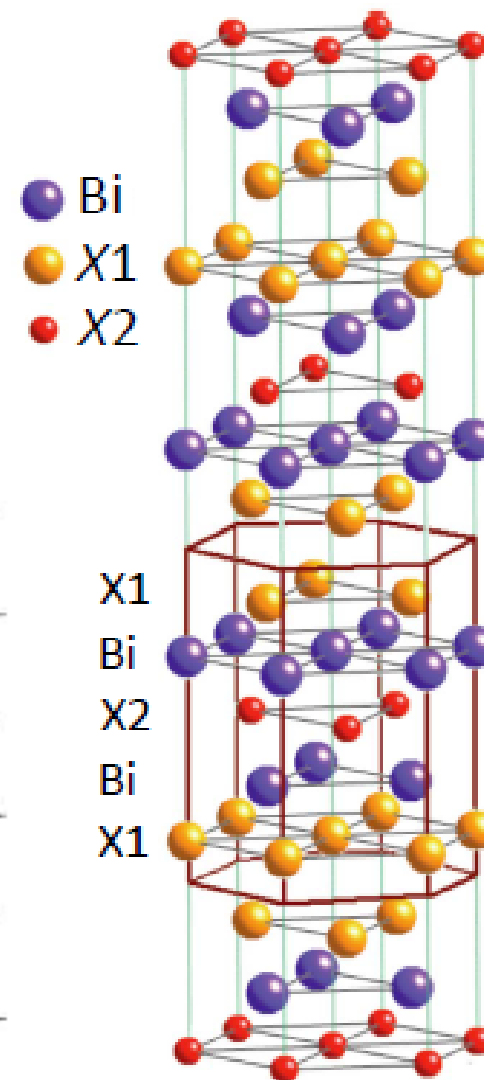


# Халькогениды висмута



$\text{Bi}_2\text{X}_1\text{X}_2$

$\left[ \begin{array}{c} \text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se} \\ \text{Bi}_2\text{Se}_3 \\ \text{Bi}_2\text{Te}_3 \end{array} \right]$



# Халькогениды висмута-сурьмы

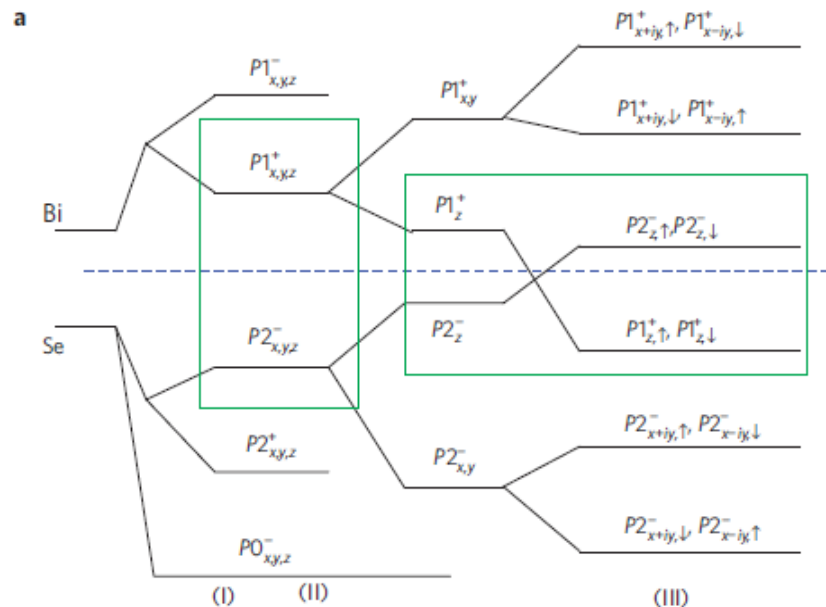
ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 10 MAY 2009 | DOI: 10.1038/NPHYS1270

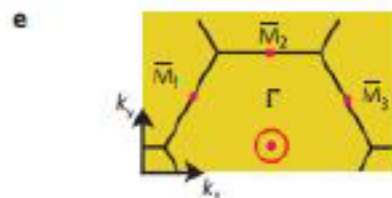
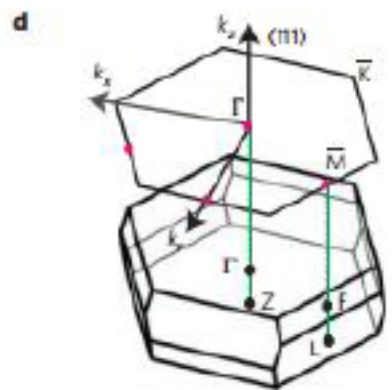
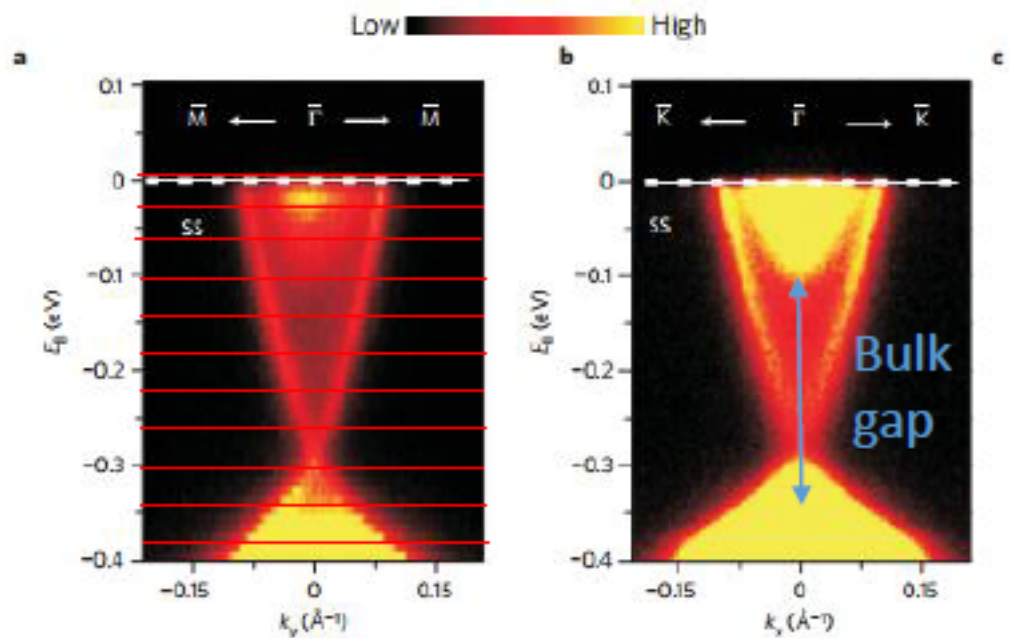
nature  
physics

## Topological insulators in $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ and $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ with a single Dirac cone on the surface

Haijun Zhang<sup>1</sup>, Chao-Xing Liu<sup>2</sup>, Xiao-Liang Qi<sup>3</sup>, Xi Dai<sup>1</sup>, Zhong Fang<sup>1</sup> and Shou-Cheng Zhang<sup>3\*</sup>



БЫЛИ ОДНОВРЕМЕННО  
ПРЕДСКАЗАНЫ ...



**И ОБНАРУЖЕНЫ**

**ГЛАВНОЕ  
ПРЕИМУЩЕСТВО  
Bi2Se3 -**

**ЩЕЛЬ 0.3 эВ**



# СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ARPES

- Spin-orbit coupling (SOC): positively charged nucleus provides effective **B**-field in rest frame of electron:

$$\mathbf{B} = -\frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{E} = -\frac{Ze}{c r^3} \mathbf{v} \times \mathbf{r} = \frac{Ze}{mcr^3} \mathbf{L}$$

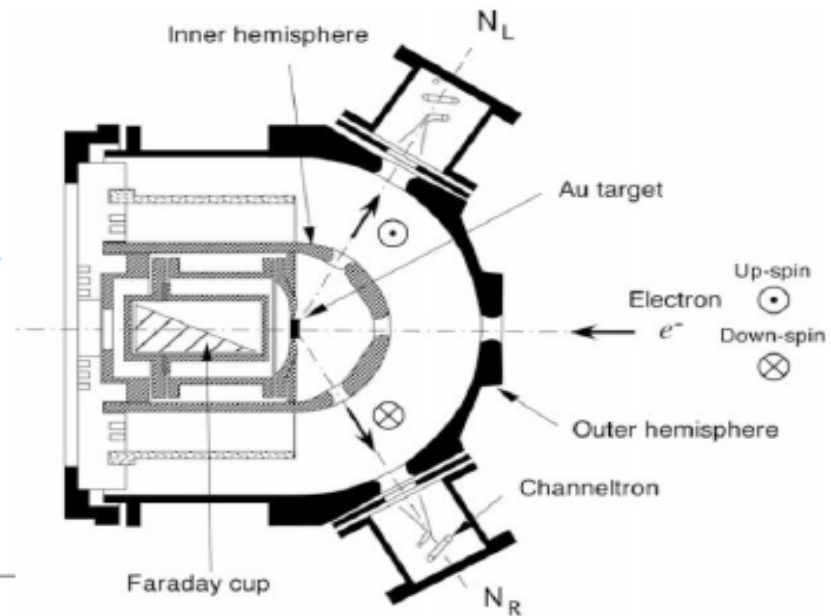
- Magnetic moment of electron:

$$\mu_e = -\frac{g_s e}{2mc} \mathbf{S}$$

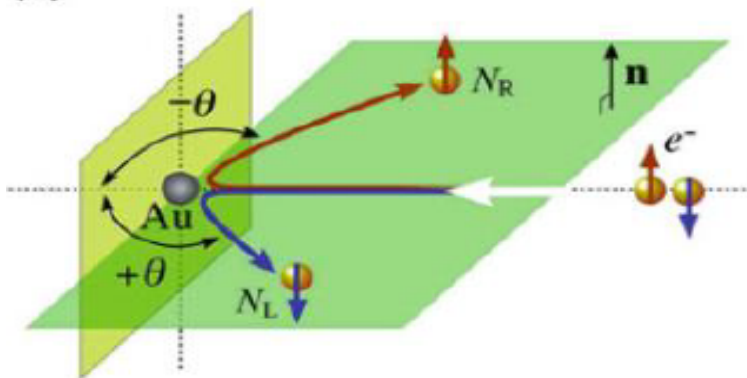
- Interaction between electron and effective B field of nucleus:

$$v_{LS} = -\mu_e \cdot \mathbf{B} = \frac{Ze^2}{2m^2 c^2 r^3} \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$$

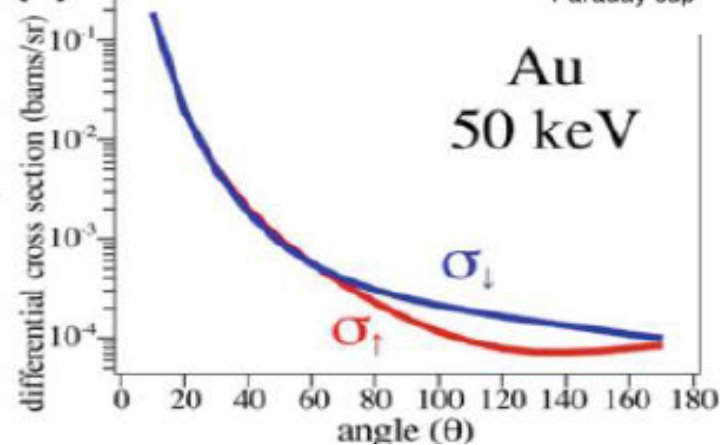
- Scattering cross section has angular asymmetry



(a)



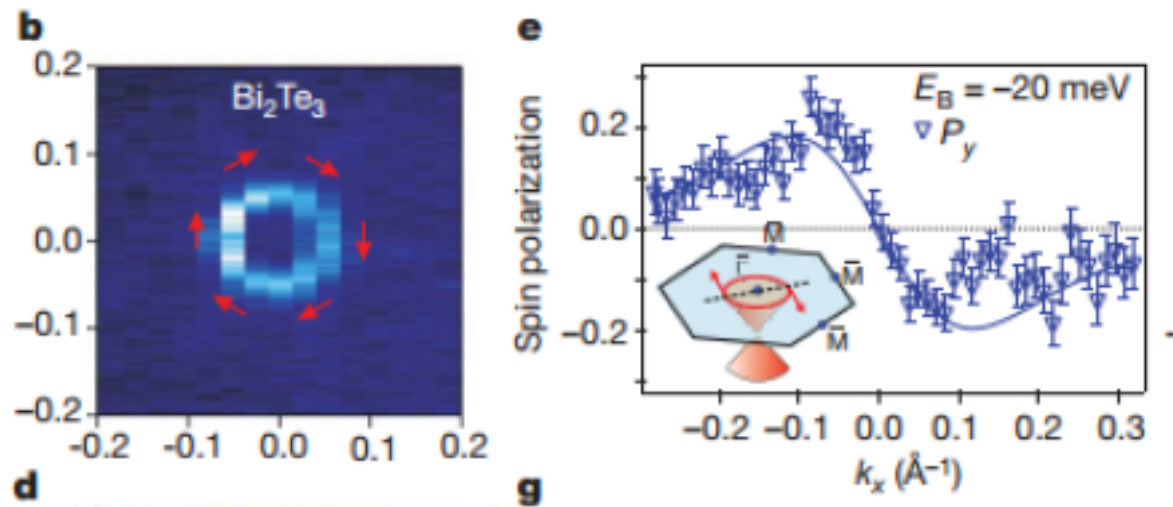
(b)



A. Takayama, *High-resolution spin-resolved photoemission spectrometer and the Rashba effect in Bismuth thin films* (2015)



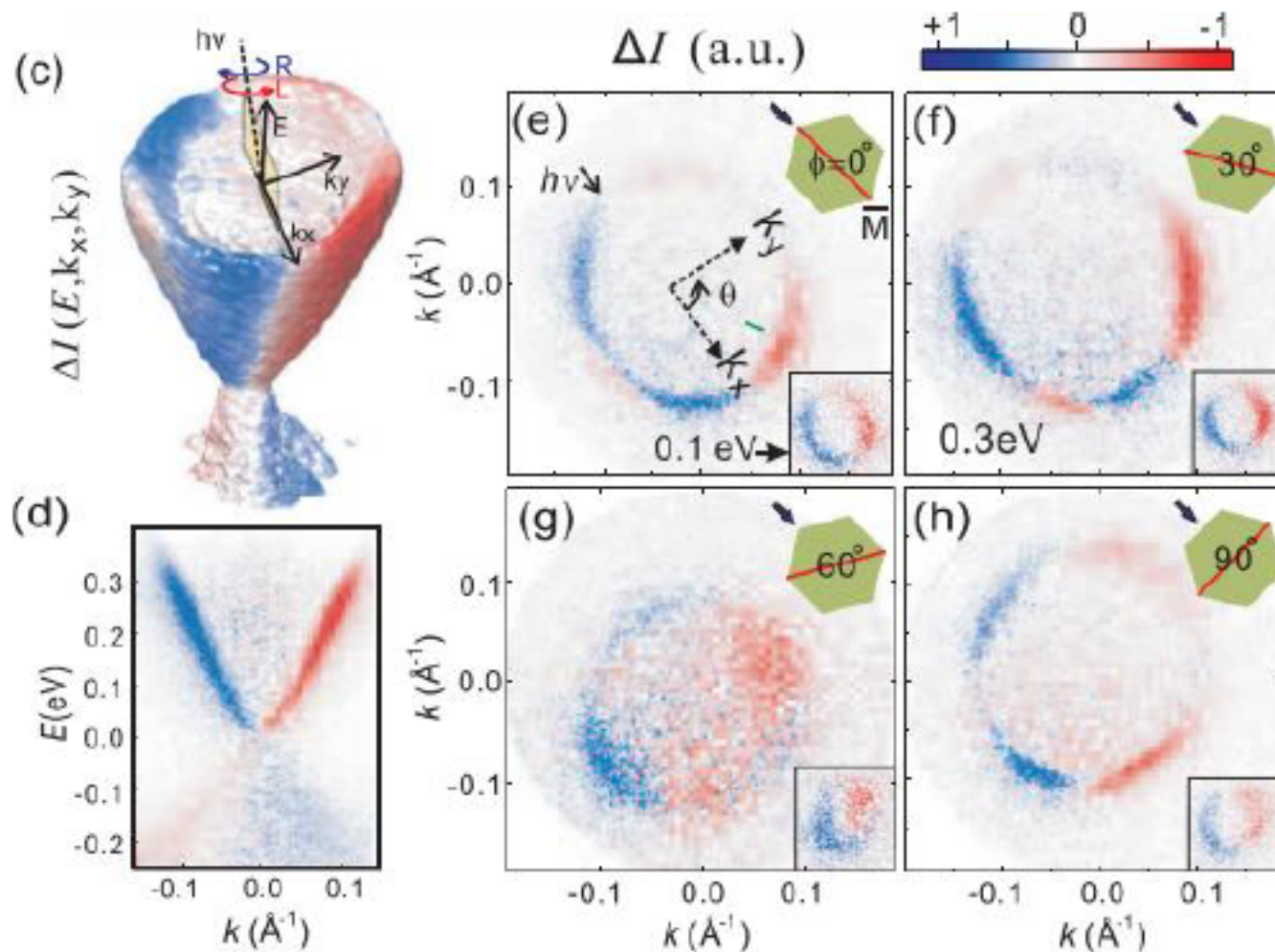
# ПОКАЗАНА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ



Hsieh *et al.* Nature **460** (2009)

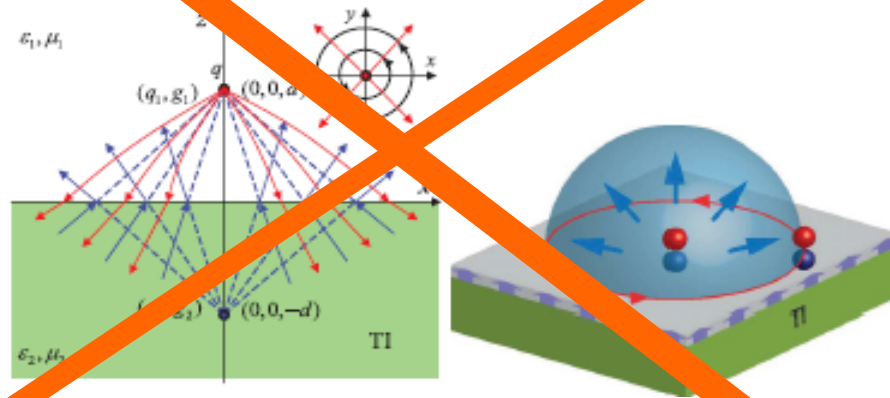
# ПО ЦИРКУЛЯРНОМУ ДИХРОИЗМУ

$$\Delta I(E, k_x, k_y) = I_{LCP} - I_{RCP}$$

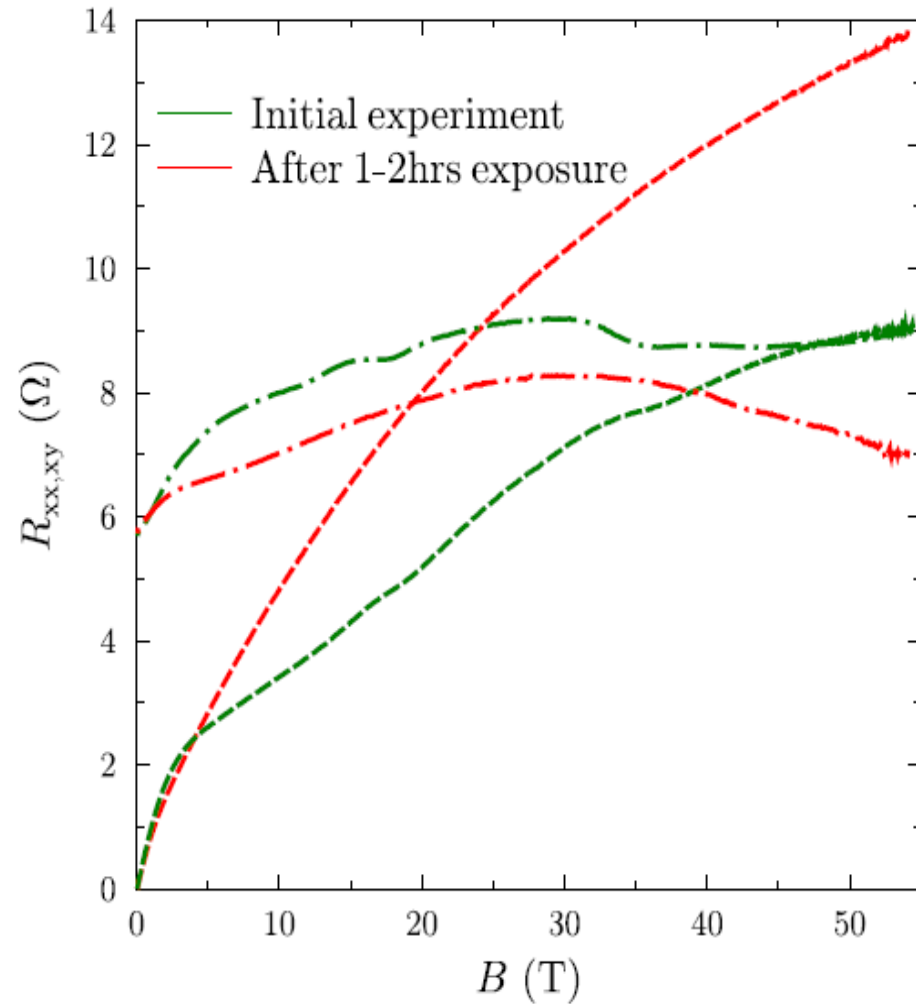
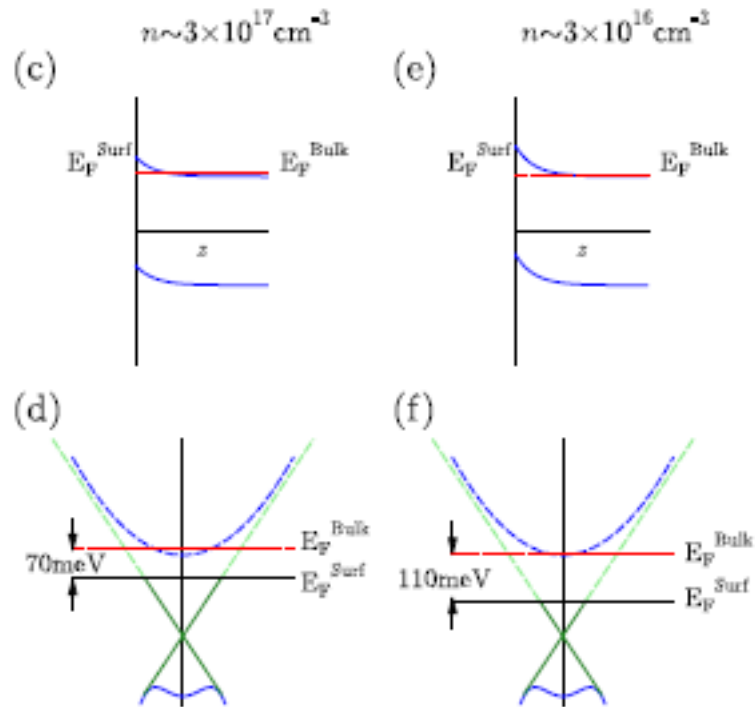


Wang *et al.* PRL **107**,  
207602 (2011)

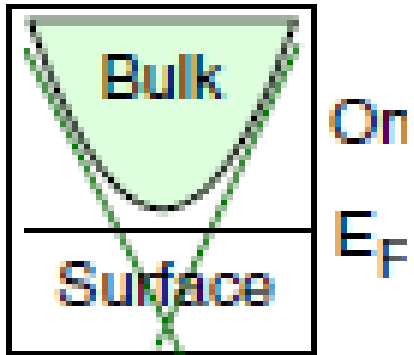
# КАК ЕЩЁ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ТОПО-СОСТОЯНИЯ?



# ПРОВОДИМОСТЬ?



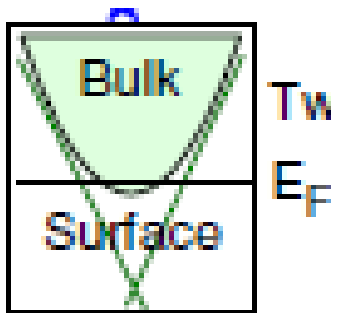
# ЕЩЁ ПАРА ПРИМЕРОВ ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ):



On these samples, transport measurements were made within 20 minutes of the sample being taken out of the MBE chamber in order to minimize the atmospheric doping effect [16]; see Supplemental Material SA [18] for measurement details. Figure 2(a) shows that

PRL 109, 116804  
(2012)

ТИ мечты



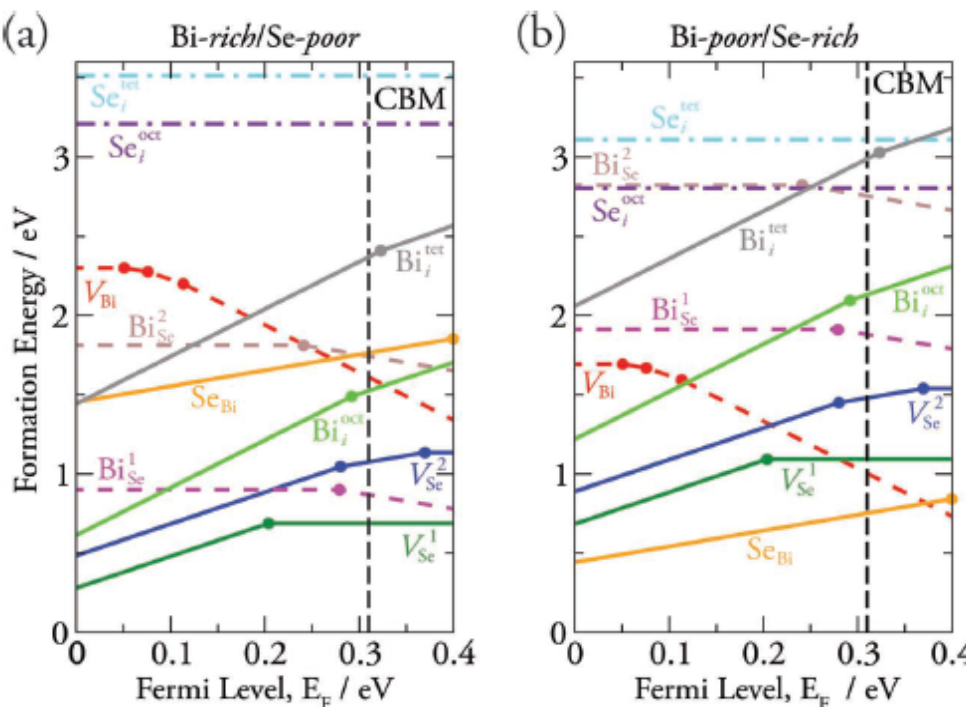
$T$ , and down to a minimum temperature of 1.5 K. The films were briefly exposed to atmosphere during the transfer from the MBE to the liquid helium cryostat. This transfer took generally between  $\sim 3 - 5$  minutes, which accounts for the sample-to-sample variation in carrier density and mobility versus thickness shown in Fig. 1(e-f) of the main text.

Suppl to PRL 113,  
026801 (2014)

ТИ В ЖИЗНИ

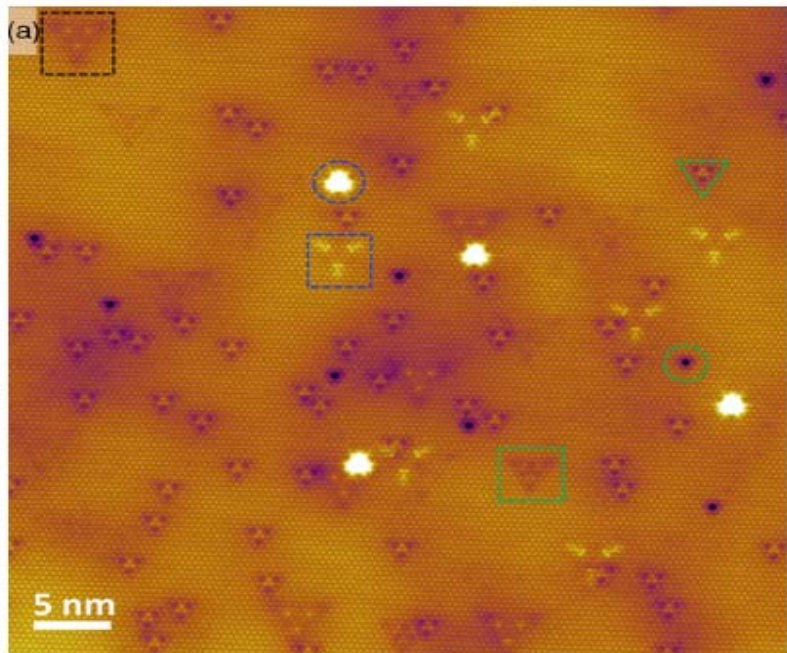
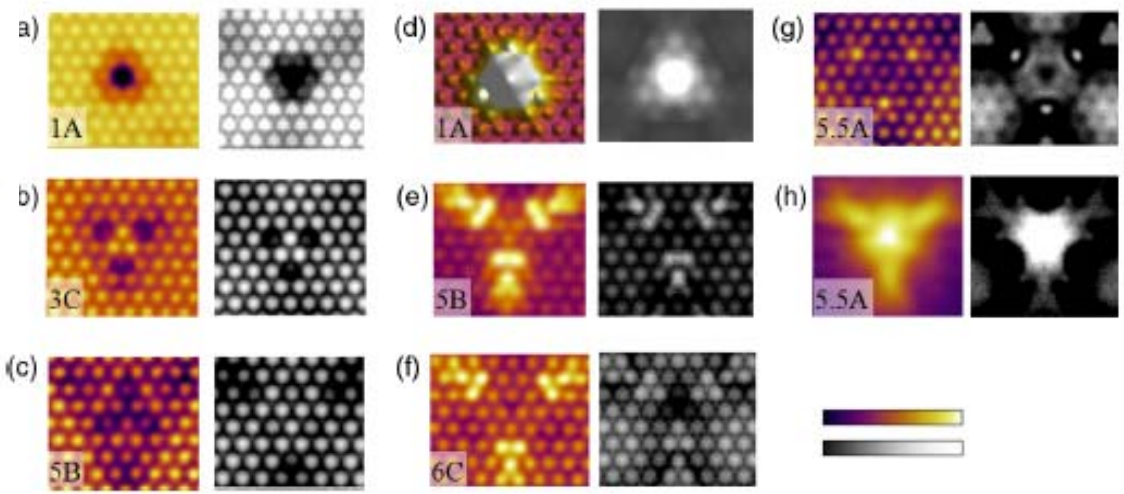
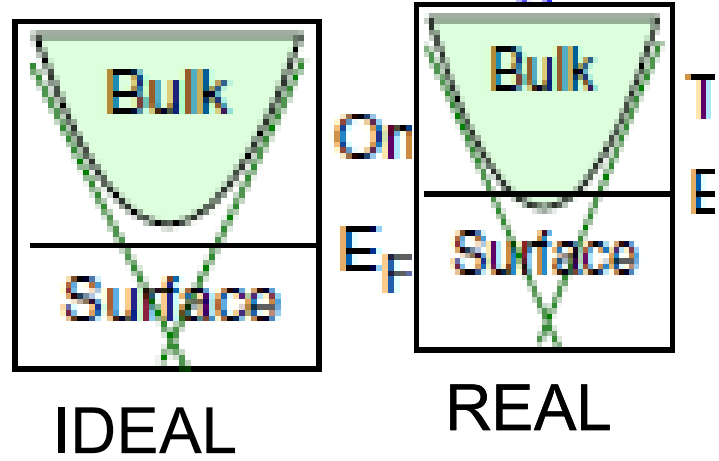


# ДЕФЕКТЫ в $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (ТОЧЕЧНЫЕ)



Calculations:

*Adv. Mater.* 2012, 24, 2154



...of native defects during synthesis. Earlier studies suggested  $\text{Se}$  vacancies ( $V_{\text{Se}}$ ) were the dominant donors in  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [29,30]. Despite intensive STM studies, there has been no the stoichiometry. However, too much  $\text{Se}$  introduces  $\text{Se}_i$ , again resulting in  $n$ -type doping. With delicate control of

J.Dai et al,

PRL 117, 106401 (2016)

# Пара исключений

*ISSN 0021-3640, JETP Letters, 2014, Vol. 100, No. 6, pp. 398–402. © Pleiades Publishing, Inc., 2014.*

## **Effect of Surface Defects and Few-Atomic Steps on the Local Density of States of the Atomically-Clean Surface of $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Topological Insulator<sup>¶</sup>**

**A. Yu. Dmitriev<sup>a, b, \*</sup>, N. I. Fedotov<sup>b</sup>, V. F. Nasretdinova<sup>b</sup>, and S. V. Zaitsev-Zotov<sup>b</sup>**

PHYSICAL REVIEW B **95**, 045123 (2017)

**Ambipolar surface state transport in nonmetallic stoichiometric  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  crystals**

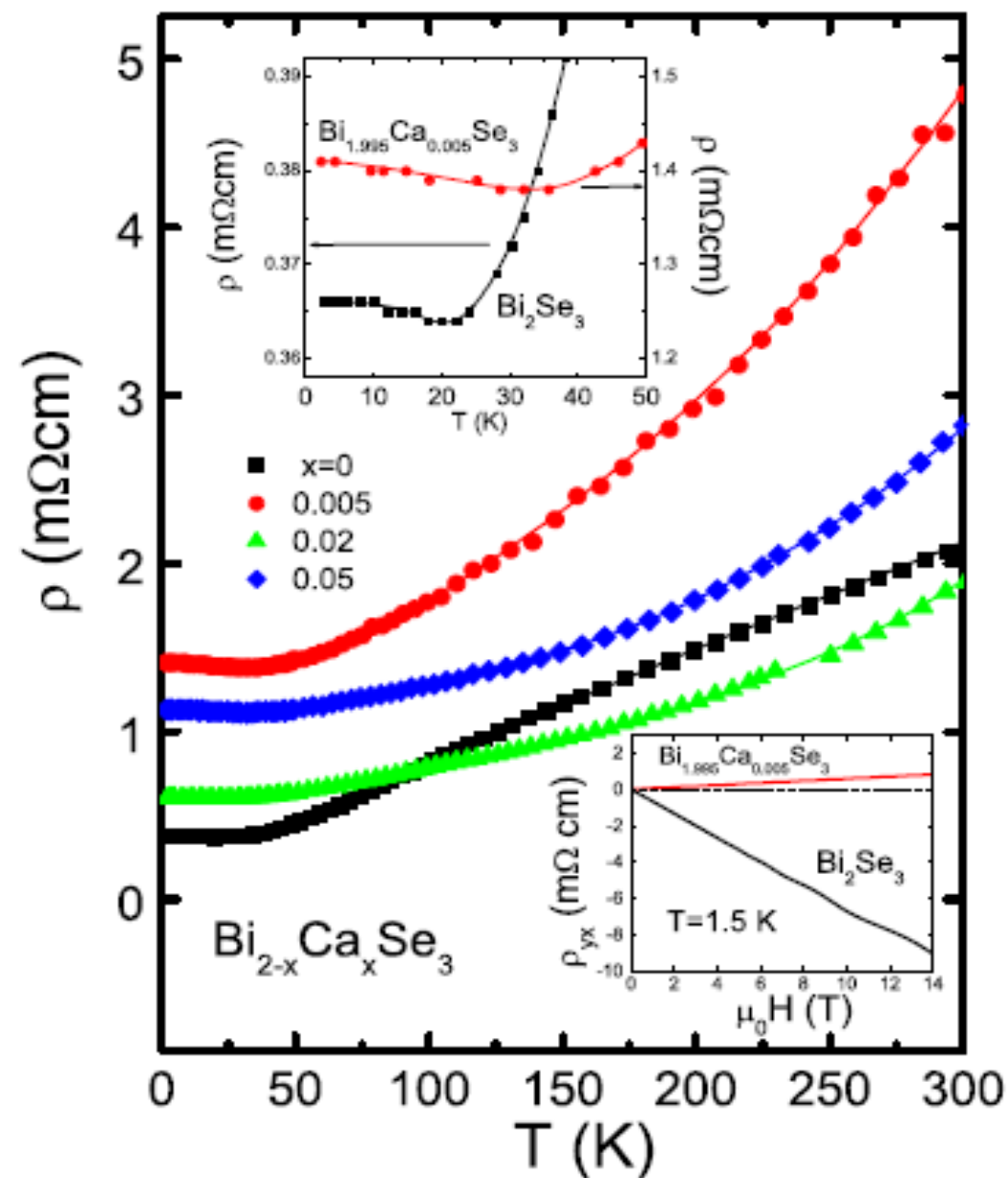
Paul Syers and Johnpierre Paglione<sup>†</sup>

# КОМПЕНСАЦИЯ??

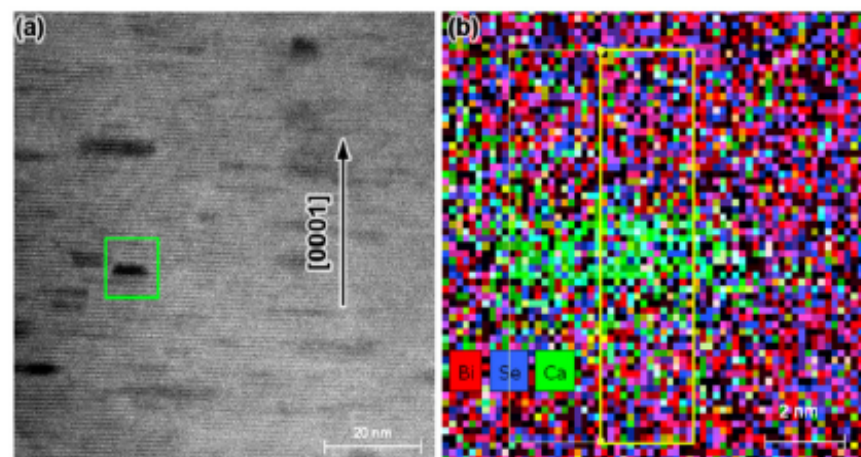
Mobility drop by ~ 1.5 orders of magnitude!!!!

Y.S. Hor et al

PHYSICAL REVIEW B 79, 195208 (2009)



Nanotechnology 27 (2016) 085601



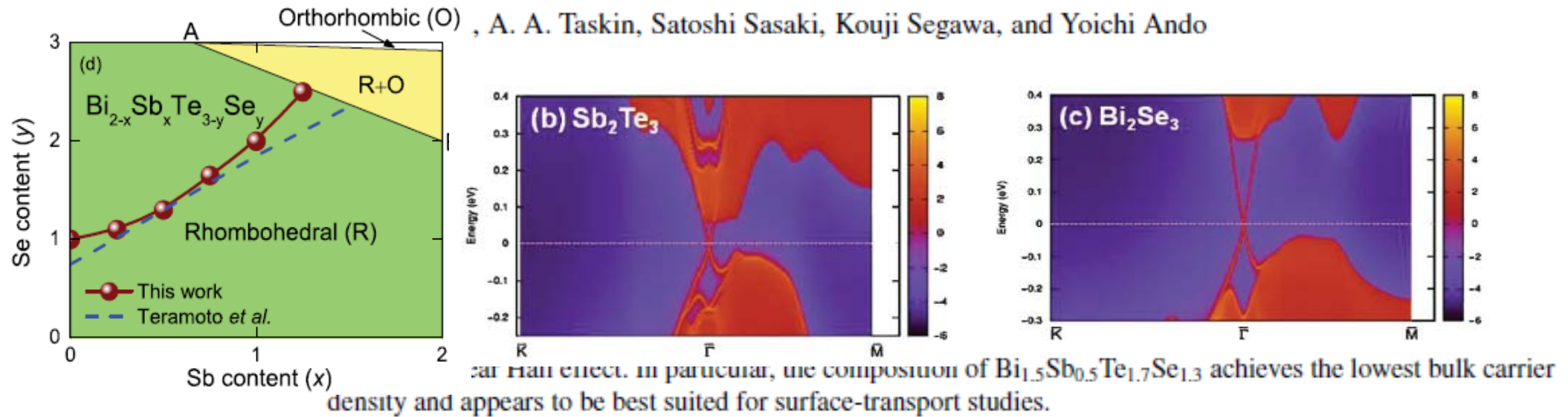
Epitaxial films: Ca clusters





## Optimizing $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ solid solutions to approach the intrinsic topological insulator regime

, A. A. Taskin, Satoshi Sasaki, Kouji Segawa, and Yoichi Ando



ДОСТОИНСТВА:  
ПОДСТРОЙКА УРОВНЯ ФЕРМИ

НЕДОСТАТКИ:  
ЧЕТВЕРНОЙ СОСТАВ – СИЛЬНЕЕ БЕСПОРЯДОК  
(НИЖЕ ПОДВИЖНОСТЬ)  
СЛОЖНЕЕ ВЫРАСТИТЬ ПЛЕНКИ  
МЕНЬШЕ ЩЕЛЬ

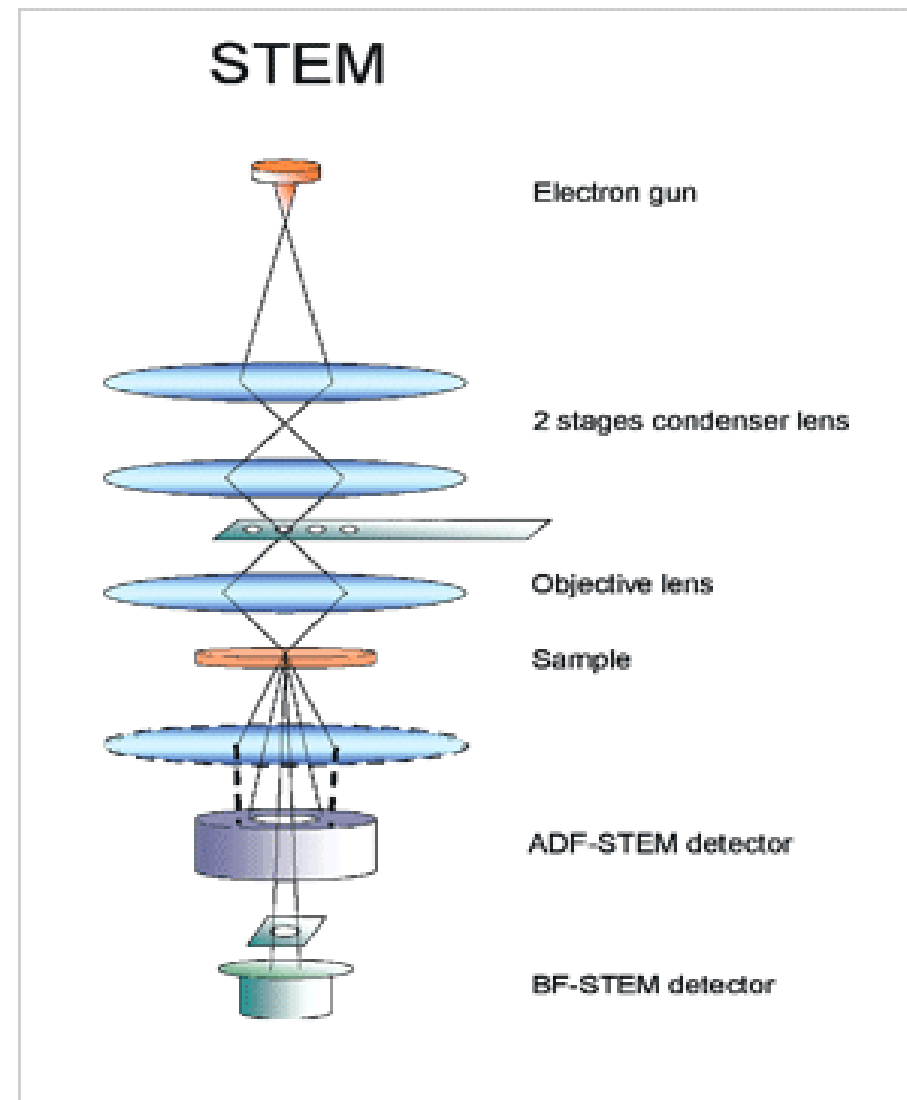
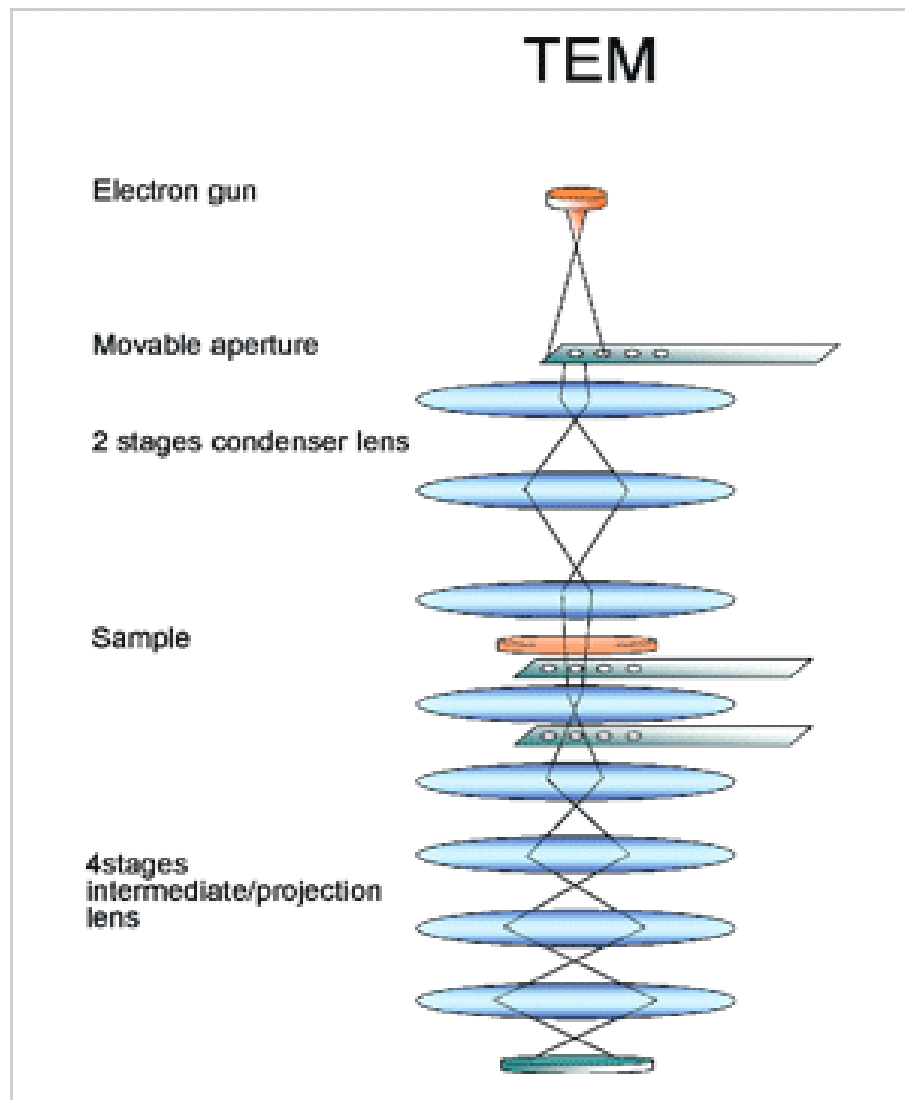
# САМЫЙ СИЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ - ПЭМ



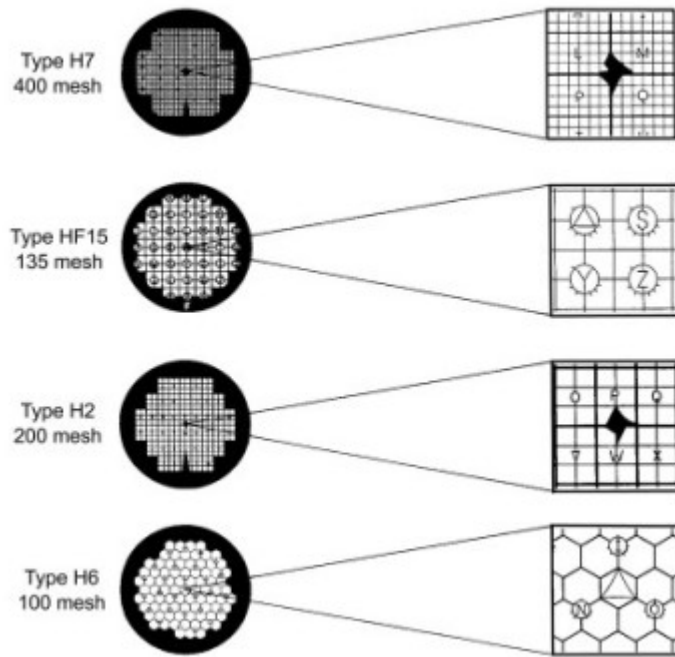
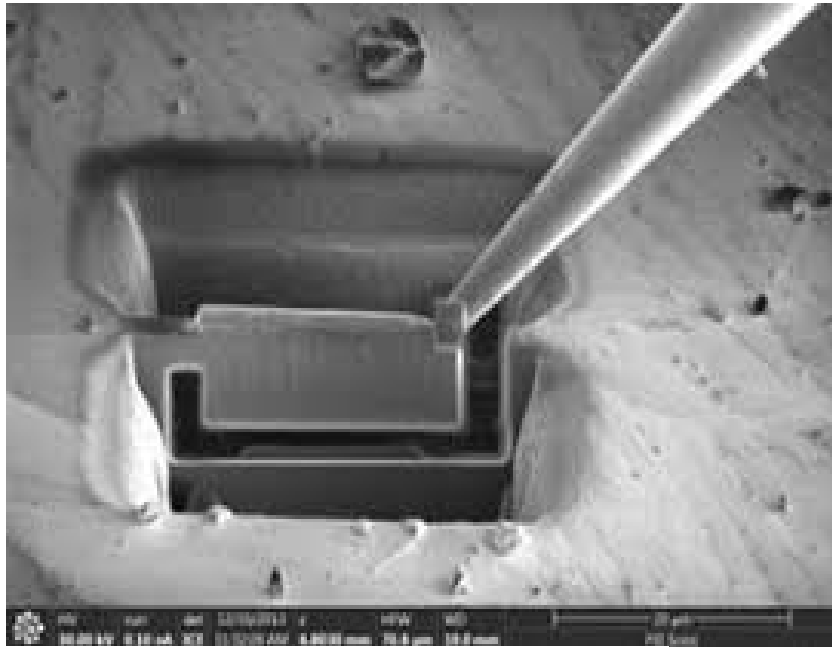
100 000 000-400 000 000 руб

В России около  
20 шт (Москва, Спб,  
Новосибирск, НН, Екб)

# Два режима работы

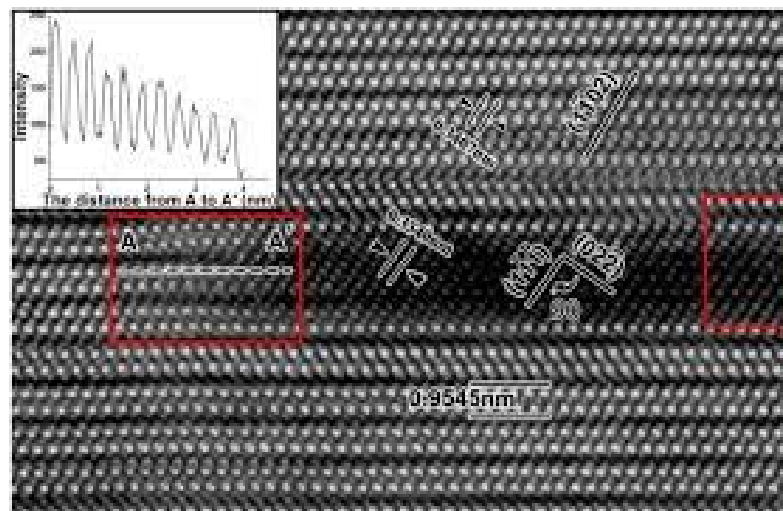
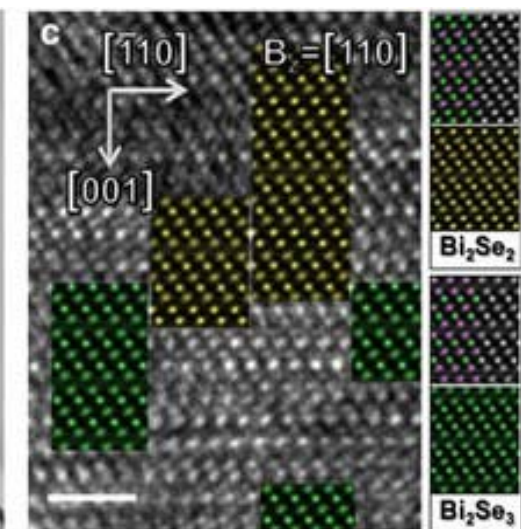
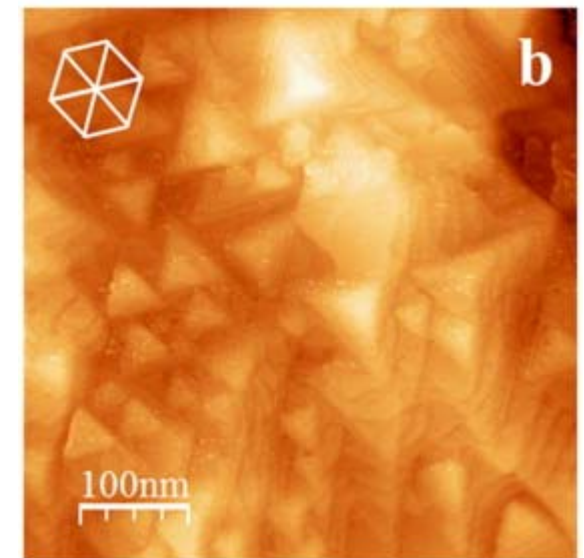
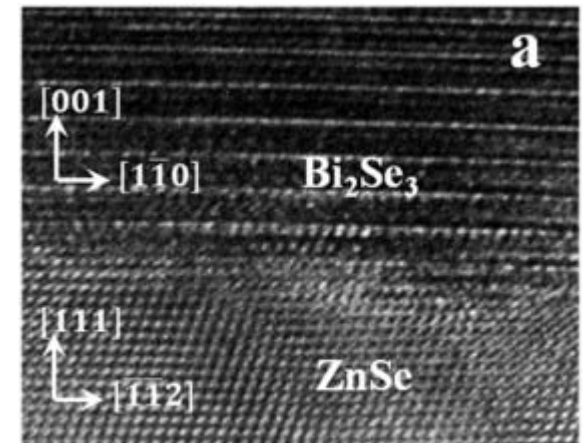
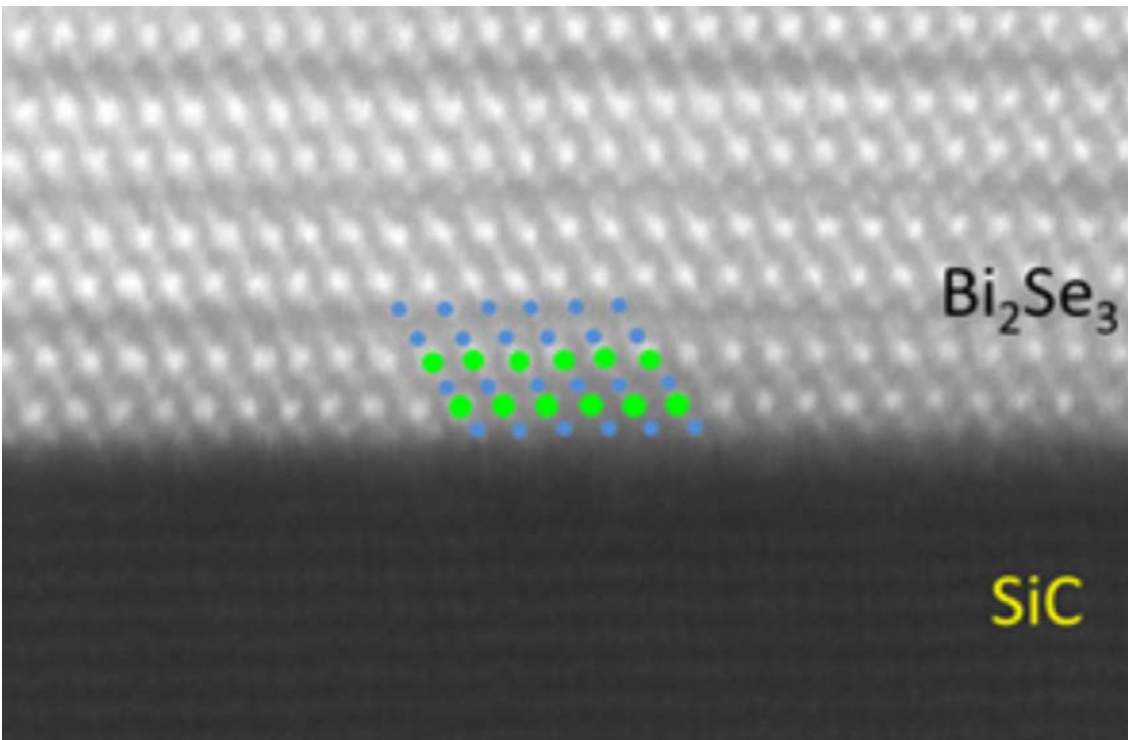


# ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ



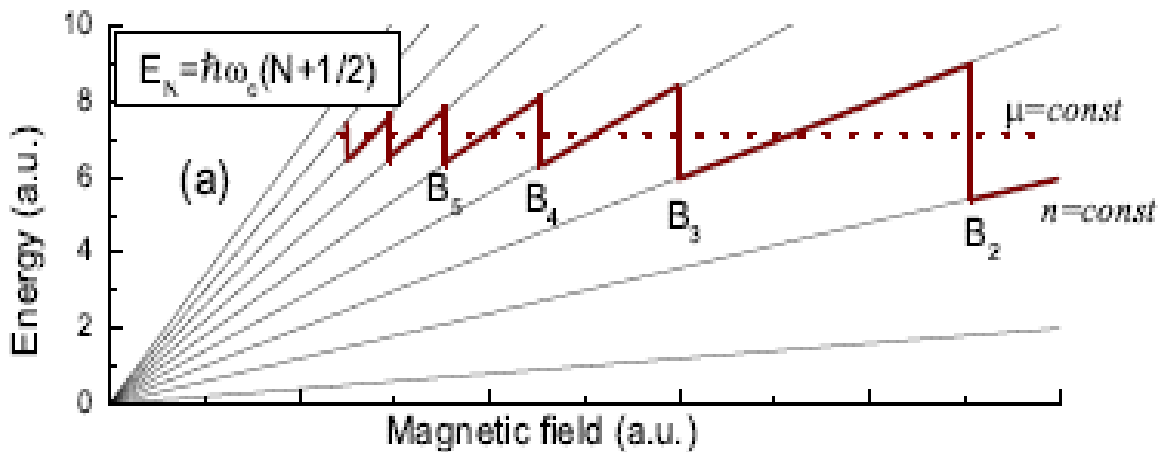
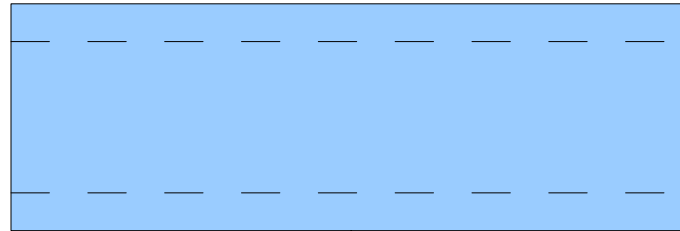
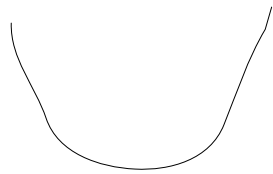
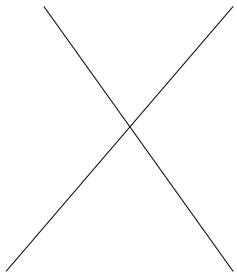
Focused Ion Beam ~ 70 000 000- 120 000 000 pyc

# ГАЛЕРЕЯ

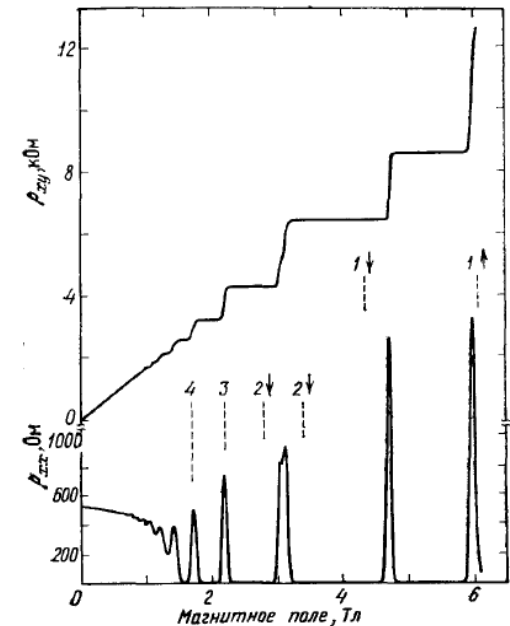


# ВЕРНЕМСЯ К ПРОВОДИМОСТИ. КАК ОТЛИЧИТЬ TSS от ОСТАЛЬНЫХ?

ВВЕСТИ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ!

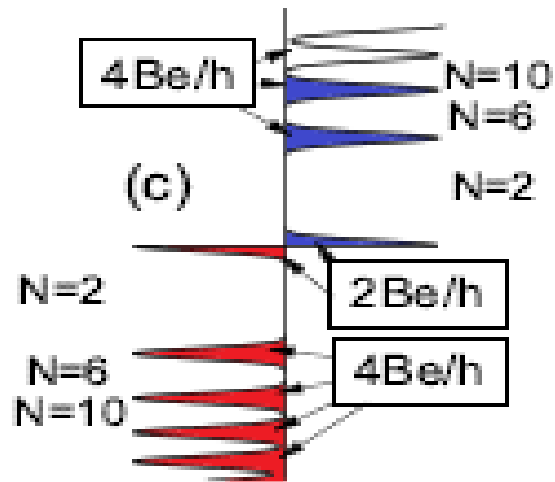


B ↑



$$1/B_N = Ne/(hn)$$

# КВАНТОВАНИЕ ЛАНДАУ ДЛЯ ДИРАКОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ



графен

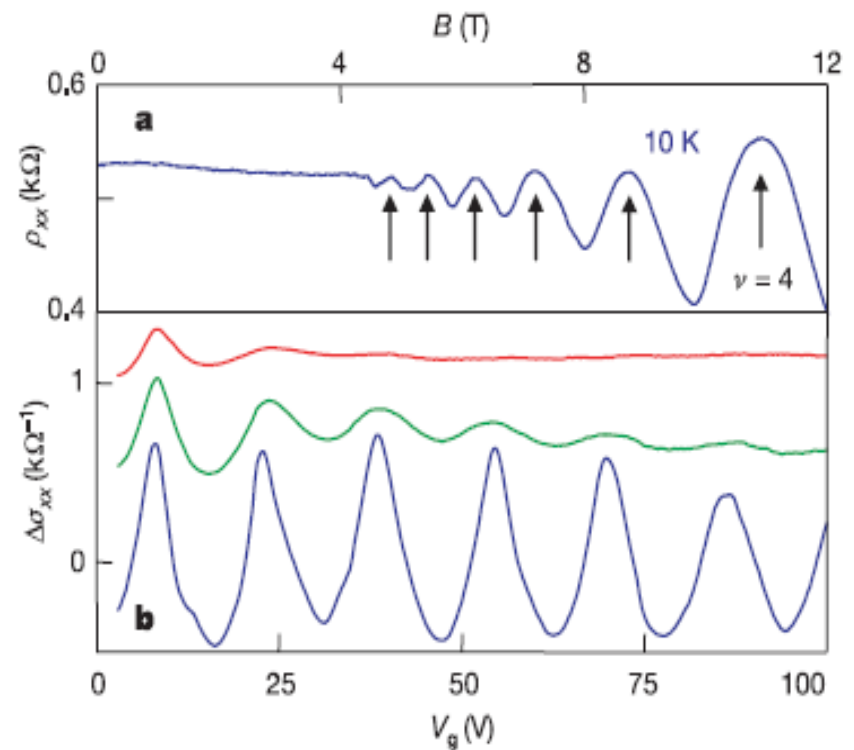
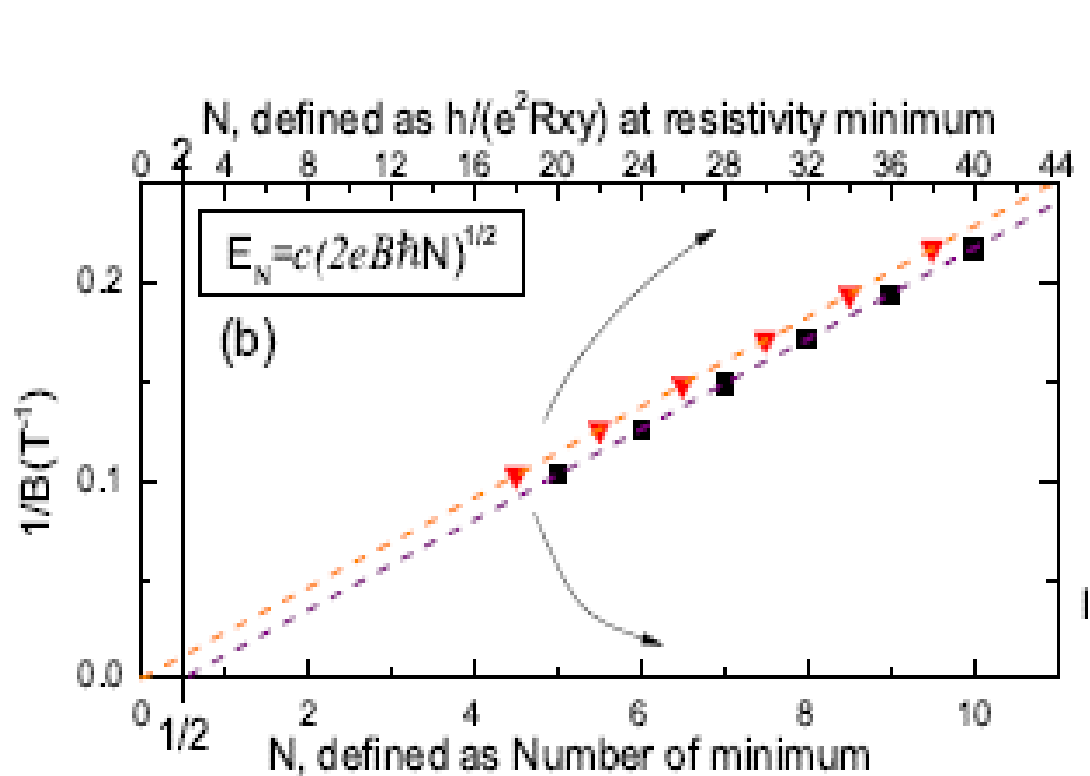
НУЛЕВОЙ УРОВЕНЬ ЛАНДАУ

НА НУЛЕВОМ уровне помещается в два раза меньше электронов.

НУЛЕВОЙ УРОВЕНЬ ЛАНДАУ ДАЕТ ВКЛАД В ХОЛЛОВСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ  $h/2e^2$



# КАК УВИДЕТЬ ЭТО ВЫРОЖДЕНИЕ: FAN DIAGRAM



Vol 438|10 November 2005|doi:10.1038/nature04233

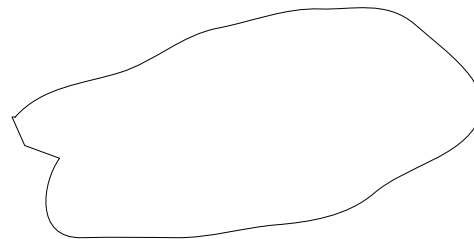
## Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene

K. S. Novoselov<sup>1</sup>, A. K. Geim<sup>1</sup>, S. V. Morozov<sup>2</sup>, D. Jiang<sup>1</sup>, M. I. Katsnelson<sup>3</sup>, I. V. Grigorieva<sup>1</sup>, S. V. Dubonos<sup>2</sup> & A. A. Firsov<sup>2</sup>

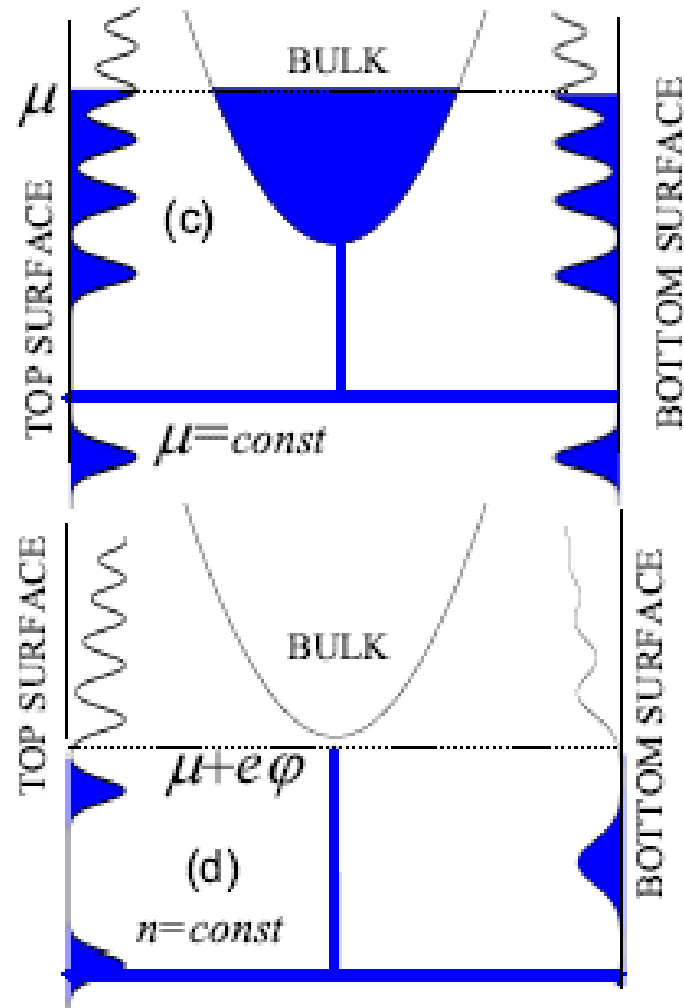
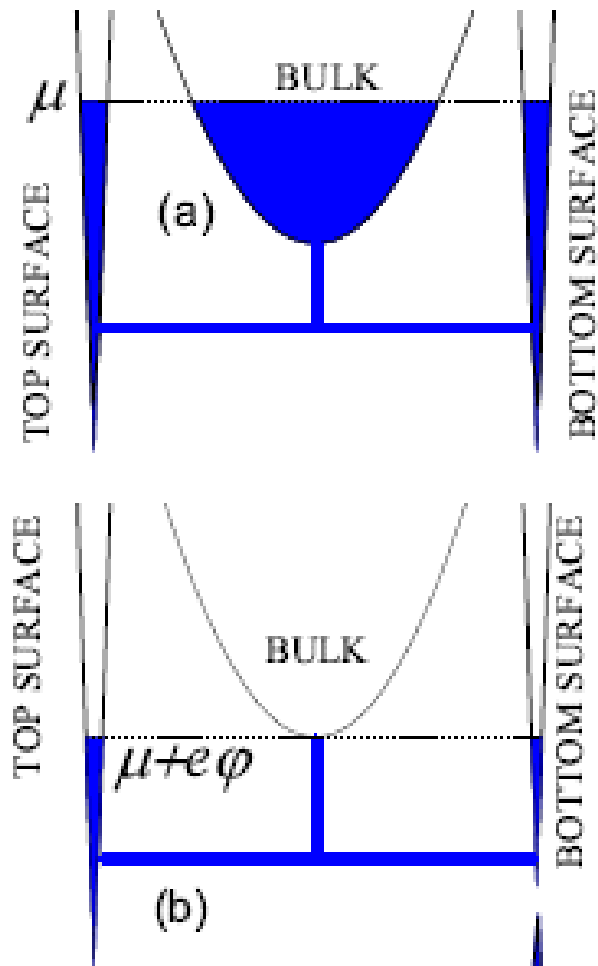
# 2D – минимум сопротивления совпадает с минимумом проводимости

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho_{xx}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2} \quad \text{and} \quad \sigma_{xy} = \frac{-\rho_{xy}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2}$$

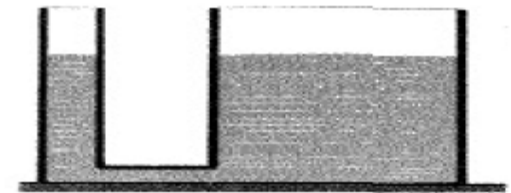
3D TI – не совпадает, надо пересчитывать  
сопротивление в проводимость, поскольку есть  
несколько каналов проводимости,  
Как пересчитать?



# ТЕРМОДИНАМИКА: $\mu = \text{const}$ vs $n = \text{const}$

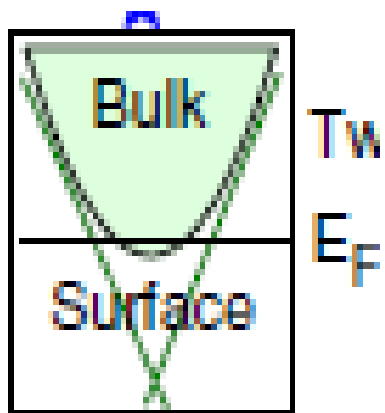


$\mu = \text{const}$



$n = \text{const} = h/eB(N + 1/2)$

# Аномальная фаза в системах с большой концентрацией

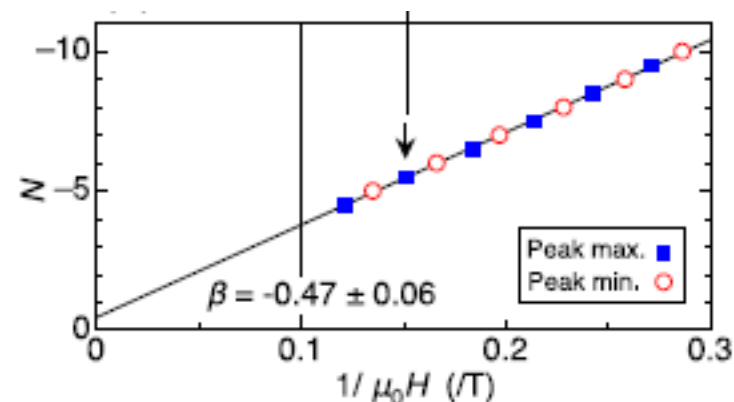
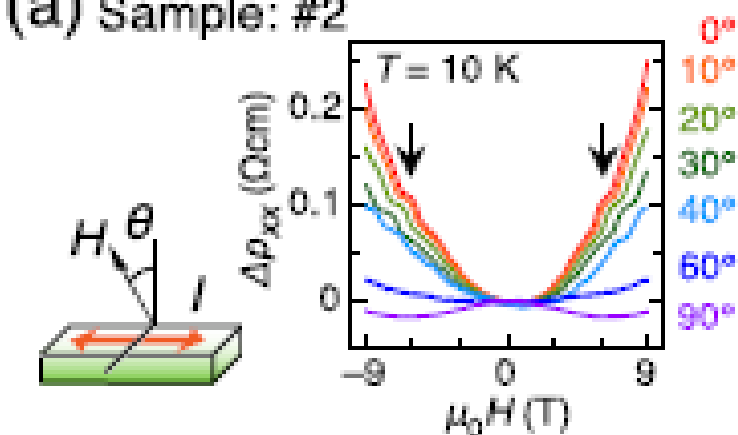


PHYSICAL REVIEW B 90, 201307(R) (2014)

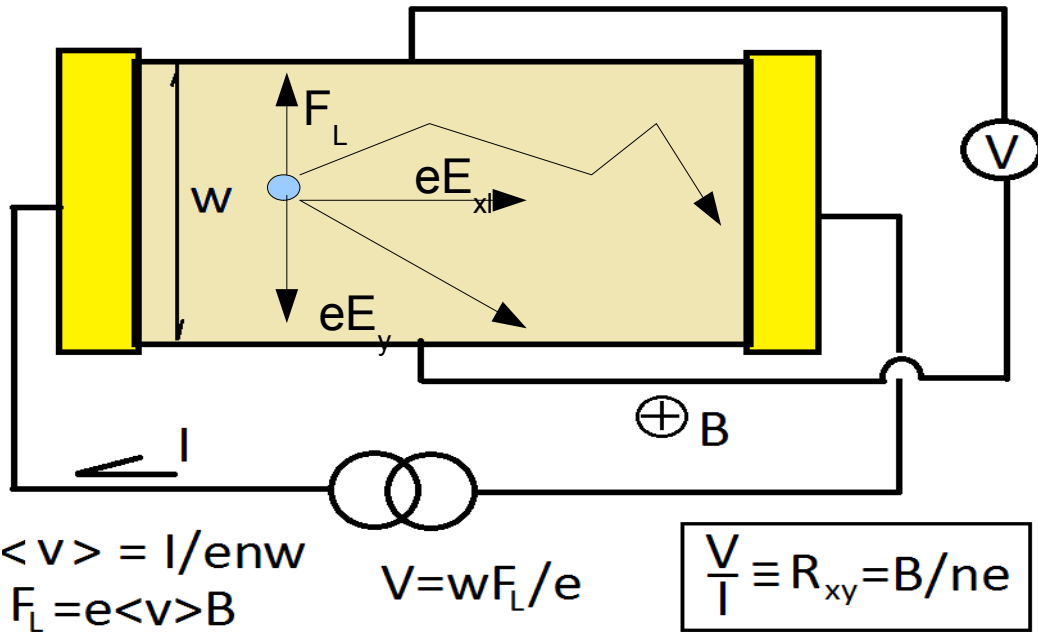
Surface Shubnikov–de Haas oscillations and nonzero Berry phases of the topological hole conduction in  $Tl_{1-x}Bi_{1+x}Se_2$

G. Eguchi,<sup>1,\*</sup> K. Kuroda,<sup>2,†</sup> K. Shirai,<sup>2</sup> A. Kimura,<sup>2</sup> and M. Shiraishi<sup>1</sup>

(a) Sample: #2



# FIGURE OF MERIT: mobility



$$\rho \approx \frac{1}{ne\mu} \begin{pmatrix} 1 & -\mu B \\ \mu B & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mu = \rho_{xy}(1T) / \rho_{xx}$$

$$1/T = 1 \text{ m}^2/\text{Vs}$$

Best n-GaAs QWs	5000 m <sup>2</sup> /Vs
Best BN/Graphene/BN	100 m <sup>2</sup> /Vs
Si at room T	0.1 m <sup>2</sup> /Vs

R ~ 500 Ohm/■

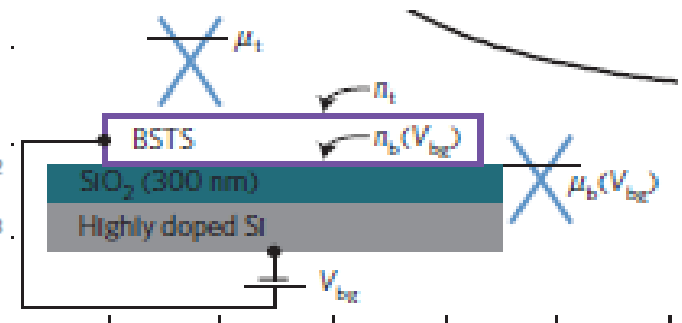
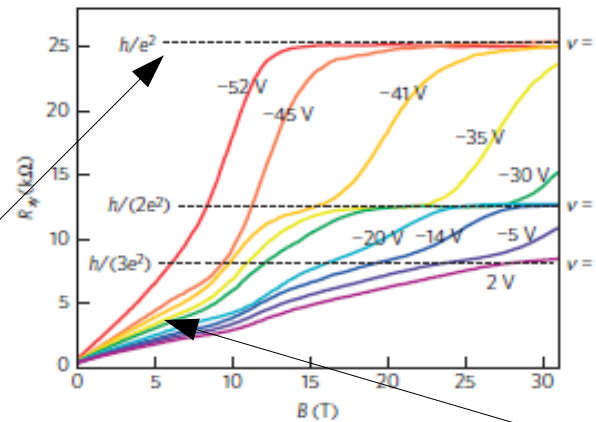
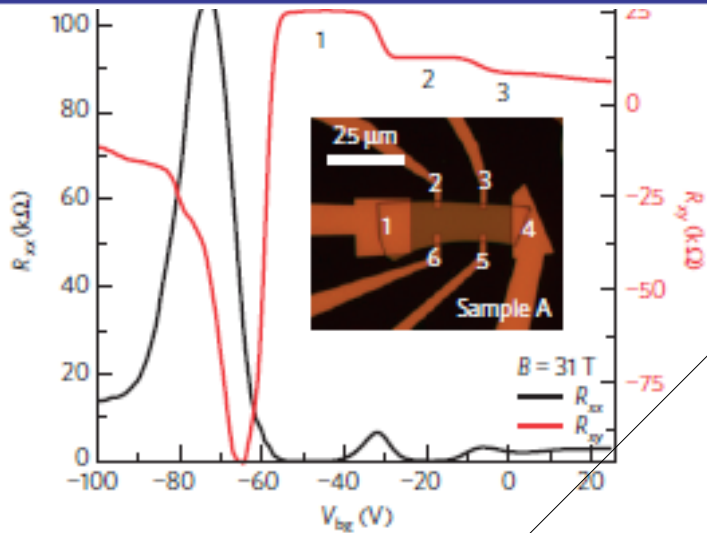
# Экспериментальные наблюдения магнетоосцилляций в халькогенидах висмута

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 10 NOVEMBER 2014 | DOI: 10.1038/NPHYS3140

Observation of topological surface state quantum Hall effect in an intrinsic three-dimensional topological insulator

Yang Xu<sup>1,2</sup>, Ireneusz Miotkowski<sup>1</sup>, Chang Liu<sup>3,4</sup>, Jifa Tian<sup>1,2</sup>, Hyoungdo Nam<sup>5</sup>, Nasser Alidoust<sup>3,4</sup>, Iimin Hu<sup>2,6</sup>, Chih-Kan Shih<sup>5</sup>, M. Zahid Hasan<sup>3,4</sup> and Yong P. Chen<sup>1,2,6\*</sup>

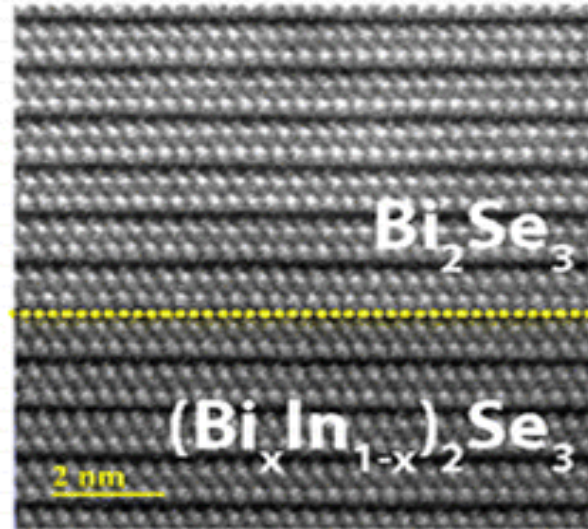
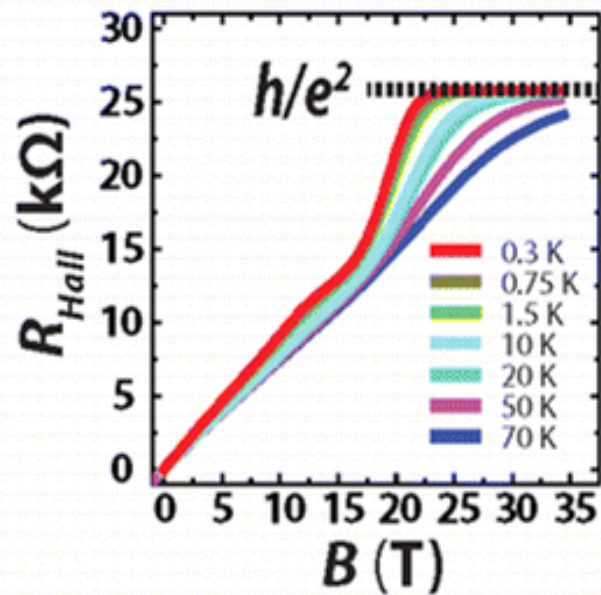


ЦКЭХ

ШДГ нет



# ЕЩЕ КЭХ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



N. Koirala et al, Nano Letters **15**, 8245, (2015)



# Экспериментальные наблюдения магнетоосцилляций в халькогенидах висмута

## High-field Shubnikov–de Haas oscillations in the topological insulator $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$

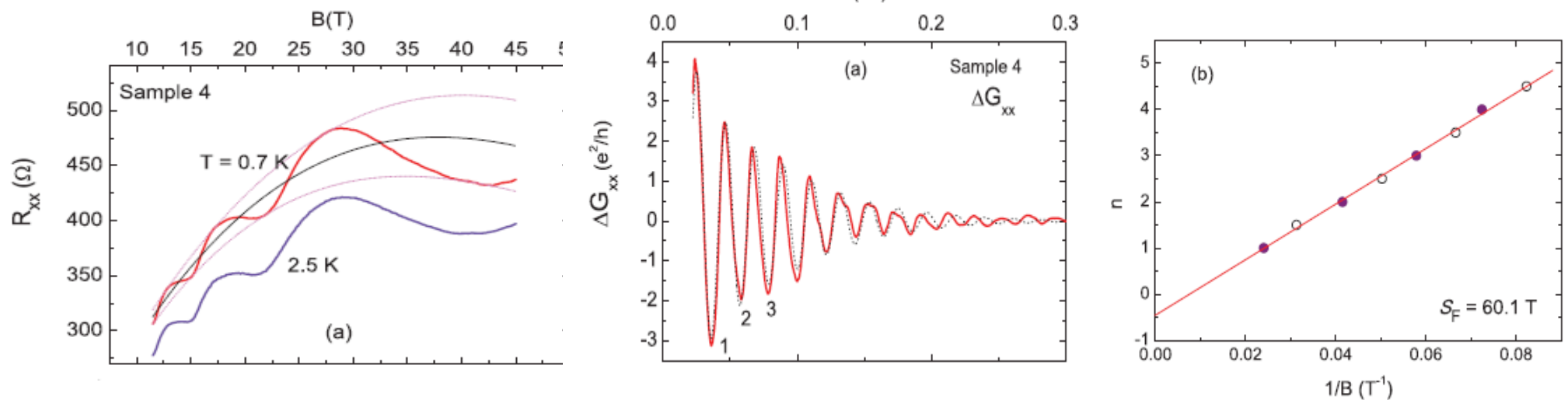
Jun Xiong,<sup>1</sup> Yongkang Luo,<sup>1,\*</sup> YueHaw Khoo,<sup>1</sup> Shuang Jia,<sup>2</sup> R. J. Cava,<sup>2</sup> and N. P. Ong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Physics, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

<sup>2</sup>*Department of Chemistry, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

(Received 3 April 2012; revised manuscript received 22 June 2012; published 17 July 2012)

We report measurements of the surface Shubnikov–de Haas oscillations (SdH) on crystals of the topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ . In crystals with large bulk resistivity ( $\sim 4 \Omega \text{ cm}$  at 4 K), we observe  $\sim 15$  surface SdH oscillations (to the  $n = 1$  Landau level) in magnetic fields  $B$  up to 45 T. Extrapolating to the limit  $1/B \rightarrow 0$ , we confirm the  $\frac{1}{2}$ -shift expected from a Dirac spectrum. The results are consistent with a very small surface Landé  $g$  factor.



# Conclusion

- на нм размерах и суб-пс временах (ARPES) в "3D TI" на основе халькогенидов висмута наблюдаются TSS...в транспорте – не очевидно

МОРАЛЬ: Битва за вещество – непростой процесс

- В следующей лекции:
  - принцип бензопилы
  - тонкие пленки
  - сверхпроводящие халькогениды висмута