

ВАКУУМНАЯ СПИНТРОНИКА

Олег Е. Терещенко

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

ЦКП «СКИФ»

Новосибирский государственный университет

ЗАО «ЭКРАН-ФЭП»



FEP



N* Новосибирский
государственный
университет
НАСТОЯЩАЯ НАУКА
«САМАЯ ЧТО НИ НА ЕСТЬ НАСТОЯЩАЯ НАУКА»
«Содержание отеческой методологии Новосибирска в мире»

Основные направления работ:

1. Создание новых инструментов и методов исследования спин-зависимых явлений, устройств и приборов вакуумной спинтроники:

Вакуумный спин-диод, спин-триод;

Новый источник спин-поляризованных электронов;

Спин-детекторы свободных электронов с пространственным разрешением;

Spin-ARPES: новый эволюционный виток;

2. Физика спин-зависимых явлений:

Эмиссия и инжекция спин поляризованных электронов;

Исследование спиновой текстуры и электронных свойств полупроводниковых материалов и структур: топологические изоляторы, низкоразмерные системы.

Планы: изучение углового орбитального момента электрона и эксперимент по спин-зависимому рассеянию e^- на хиральных молекулах. Спин-зависимый масс-спектрометрический анализ хиральных молекул.

Direct spin imaging detector based on freestanding magnetic nanomembranes with electron optical amplification

O. E. Tereshchenko,^{1,2,3,*} V. V. Bakin,¹ S. A. Stepanov,³ V. A. Golyashov,^{1,2,3} A. S. Mikaeva,¹
D. A. Kustov,¹ V. S. Rusetsky,^{1,4} S. A. Rozhkov,^{1,3} H. E. Scheibler,^{1,3} and A. Yu. Demin⁴

¹*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia*

²*Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Koltsovo 630559, Russia*

³*Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090 Russia*

⁴*CJSC "EKTRAN FEP", Novosibirsk 630060, Russia*

(Dated: October 2, 2024)

An analog of the optical polarizer/analyzer for electrons, a spin filter based on freestanding ferromagnetic (FM) nanomembrane covering the entrance of the microchannel plate (MCP) was applied for efficient spin filtering and electron amplification in the 2D field of view. To study the spin dependent transmission, we constructed a spin-triode device (spintron), which consists of a compact proximity focused vacuum tube with the Na₂KSb spin-polarized electron source, the FM-MCP and phosphor screen placed to run parallel to each other. Here, we demonstrate the fabrication of FM nanomembranes consisting of a [Co/Pt] superlattice deposited on a freestanding 3 nm SiO₂ layer with a total thickness of 10 nm. The FM-MCP has $\sim 10^6$ channels with a single-channel Sherman function $S = 0.6$ and a transmission of $\sim 1.5 \times 10^{-3}$ in the low electron energy range. The FM-MCP-based device provides a compact optical method for measuring the spin polarization of free electron beams in the imaging mode and is well suited for photoemission spectroscopy and microscopy methods.

New Spin-Polarized Electron Source Based on Alkali Antimonide Photocathode

V. S. Rusetsky^{1,2}, V. A. Golyashov^{1,3,4}, S. V. Ereemeev,⁵ D. A. Kustov¹, I. P. Rusinov,⁶ T. S. Shamirzaev^{1,4},
A. V. Mironov,² A. Yu. Demin,² and O. E. Tereshchenko^{1,3,4,*}

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia

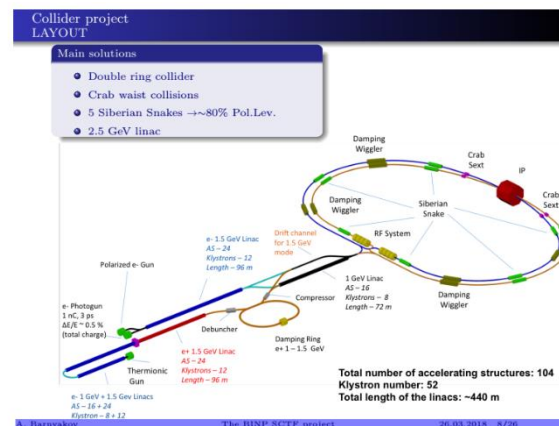
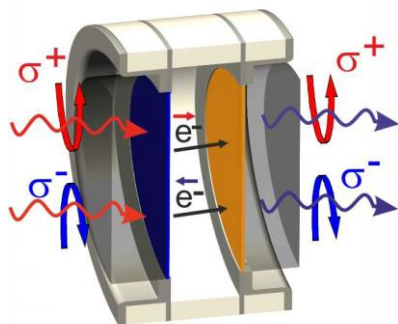
²CJSC “Ekran FEP”, Novosibirsk 630060, Russia

³Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kol'tsovo 630559, Russia

⁴Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090 Russia

⁵Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk 634055, Russia

⁶Tomsk State University, Tomsk 634050, Russia





ОПТИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР СПИНА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ



Создан полупроводниковый спин-детектор свободных электронов с пространственным разрешением, принцип работы которого заключается в инжекции свободных спин-поляризованных электронов в гетероструктуру A_3B_5 и регистрации катодолюминесценции с двумерным распределением интенсивности и поляризации. Предложена схема интегрирования детектора в устройство фотоэмиссии с угловым разрешением, с потенциальным увеличением эффективности детектирования спиновой поляризации в 10^4-10^6 раз относительно эффективности существующих одноканальных спин-детекторов.

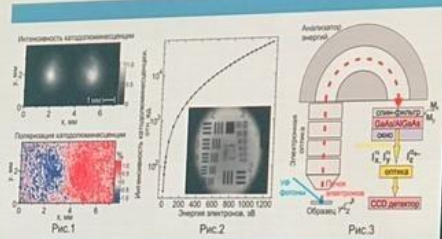


Рис.1. Картины распределения поляризованной катодолюминесценции при инжекции в структуру GaAs/AlGaAs двух пучков спин-поляризованных электронов.
Рис.2. Зависимость интенсивности катодолюминесценции от энергии электронов, и перевернутое в катодолюминесценцию изображение тестового объекта с пространственным разрешением ≤ 5 мкм.
Рис.3. Схема работы спин-детектора в методе фотоэмиссии с угловым разрешением.

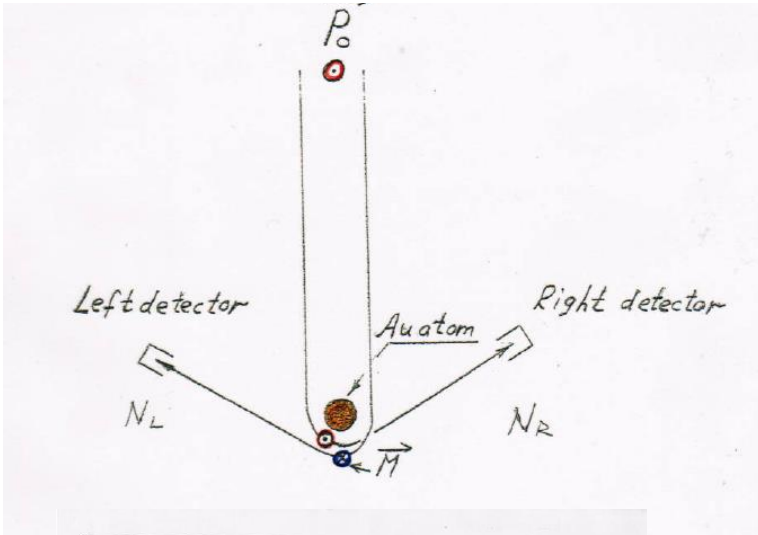
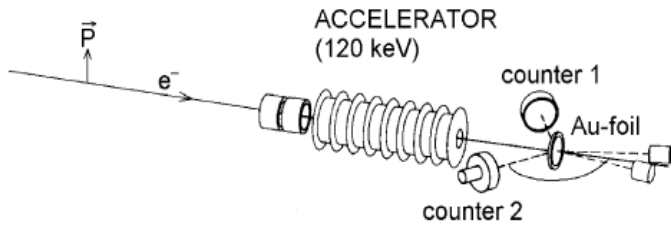
Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова СО РАН, ЗАО «ЭКРАН-ФЭП»
O.E. Tereshchenko, V.A. Golyashov, V.S. Rusetsky, A.V. Mironov, A.Yu. Demin, V.V. Aksenov, J. Synchrotron Rad., v. 28, pp. 864-875 (2021).



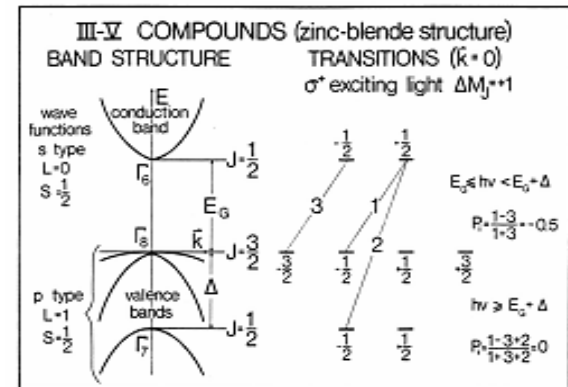
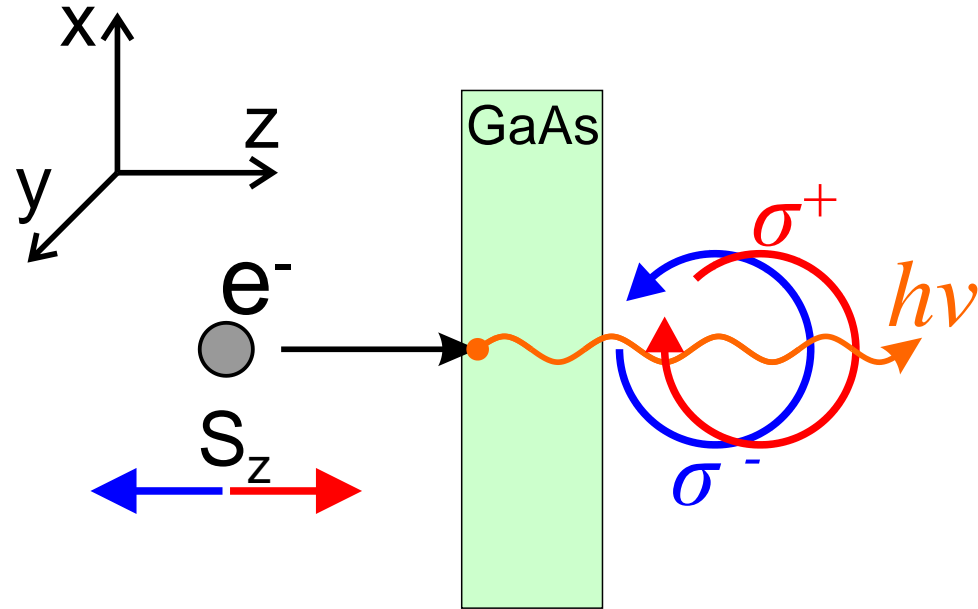
Регистрация спина электрона в физике высоких и низких энергий

Mott detector

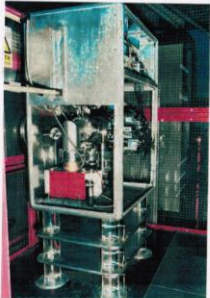
- based on the spin-orbit interaction of electrons



$$\mathcal{H}_{SO} = \frac{-\hbar}{2m^2c^2} \vec{\sigma} \cdot (\vec{p} \times \vec{\nabla}(V))$$



Classical Mott Detectors



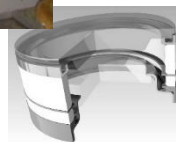
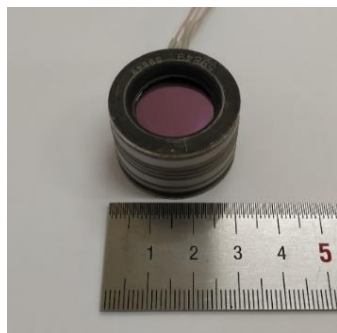
The 100 kV Mott Detector at Daresbury Lab



Sir Nevill F. Mott at Daresbury Lab

Спиновый вакуумный фотодиод с полупроводниковыми электродами с эффективным отрицательным электронным средством

Спиновый вакуумный фотодиод



Свойства и применения:

Изучение фотоэмиссии электронов очень низкой энергии

Изучение инъекции электронов в полупроводниковые гетероструктуры

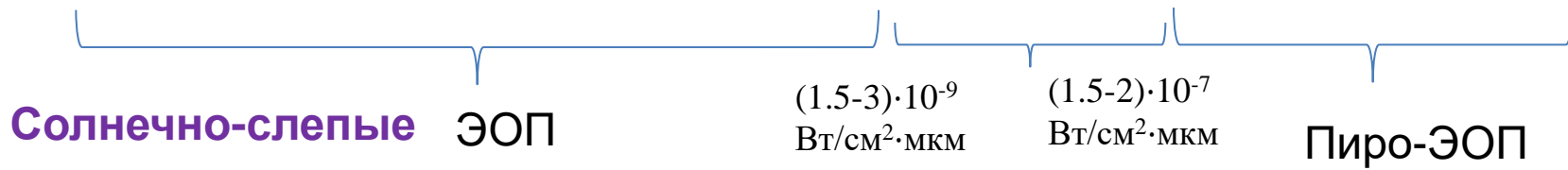
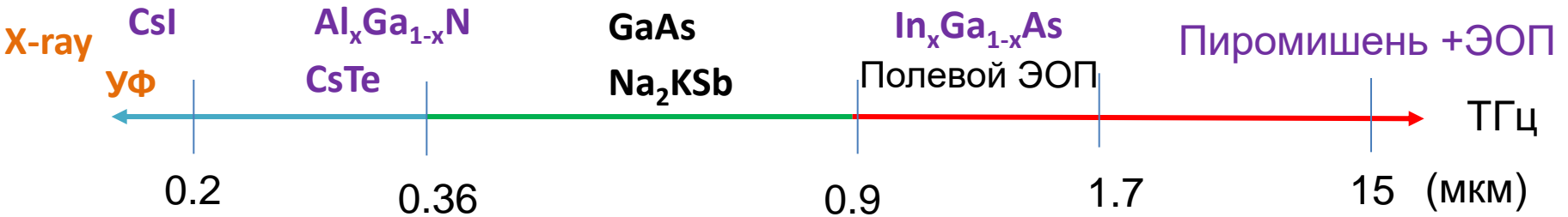
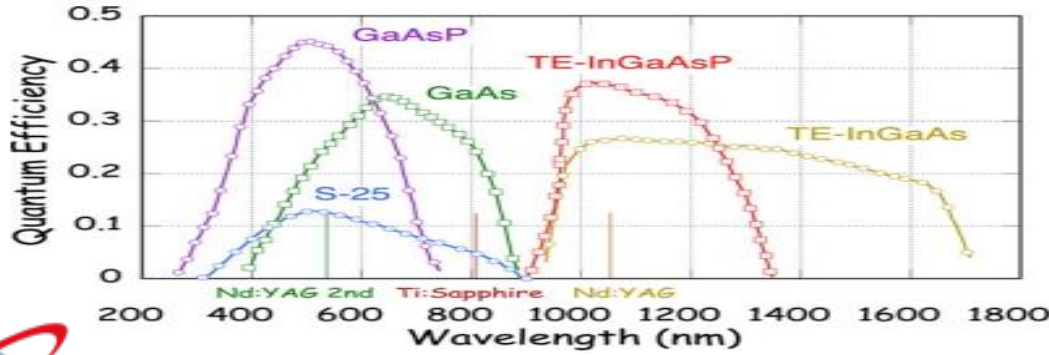
Спин-детектор свободных электронов

Источник спин-поляризованных электронов

Фотоэмиссионный солнечный элемент

Phys. Rev. Appl. (2024)
Nanomaterials (2023) 13, 422
Phys. Rev. Lett. (2022) 129
J. Synchrotron Rad. (2021) 28
Ultramicroscopy 218 (2020) 113076
Phys. Rev. Appl. 8, (2017) 034026
Scientific Reports 7, 16154, (2017)

Электронно-оптические преобразователи от X-диапазона до ТГц в режиме счета фотонов: безмультиплексорная оптоэлектроника



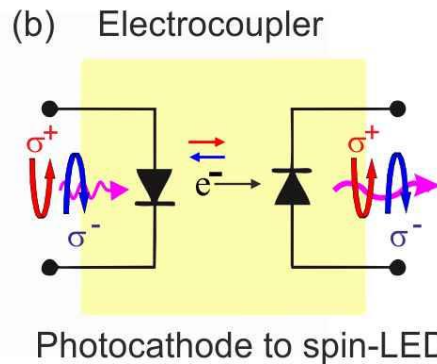
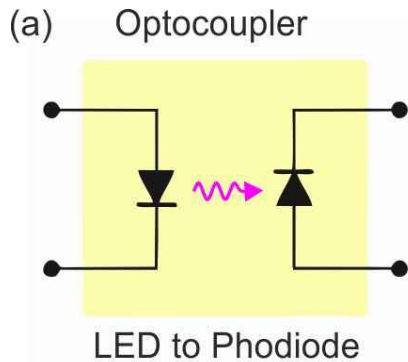
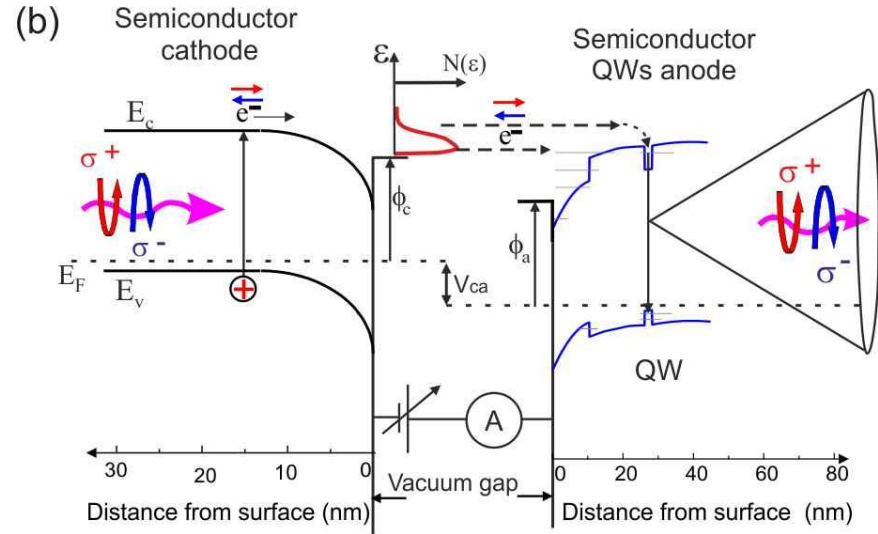
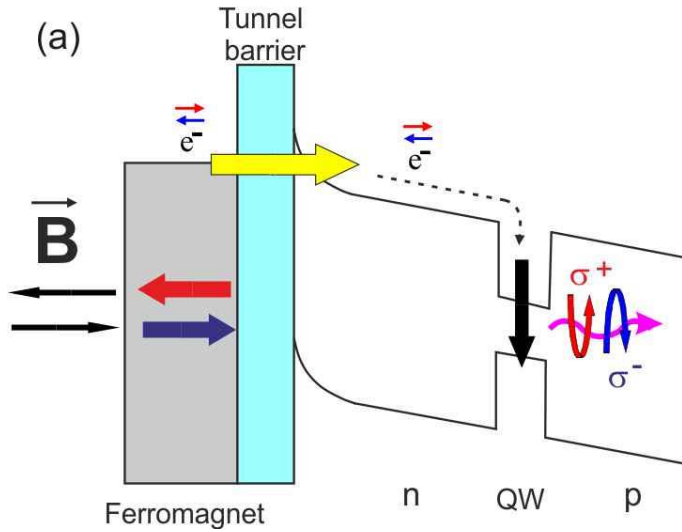
КОСМОС
МОНИТОРИНГ

Ночное видение

Тепловидение

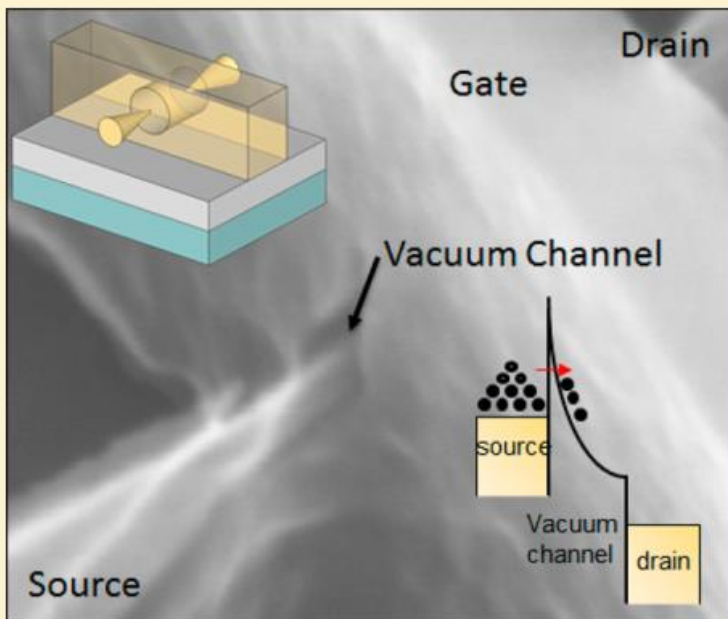
Детектор
заряженных частиц

Transformation of the monolithic spin-LED into vacuum spin-LED



**No magnetic layers and
no external magnetic field!**

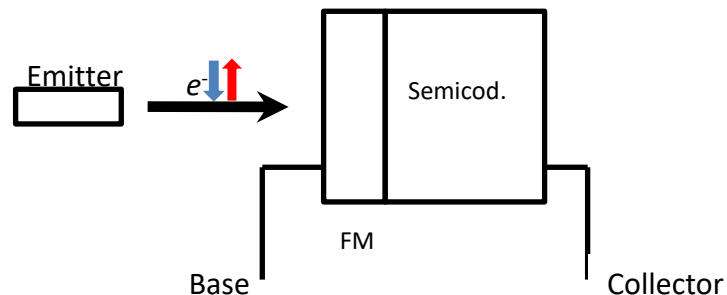
Vacuum nanoelectronics: Back to the future?—Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor



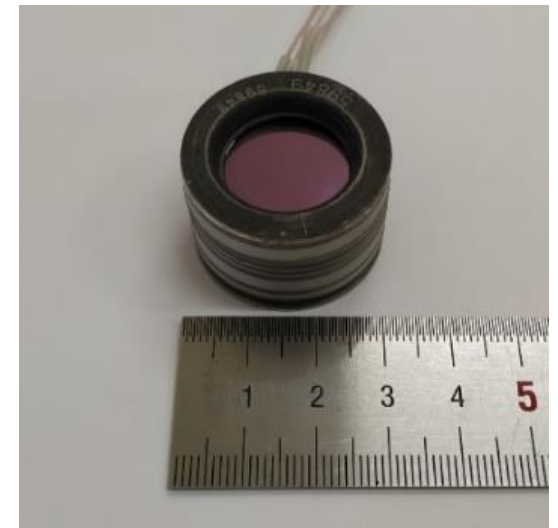
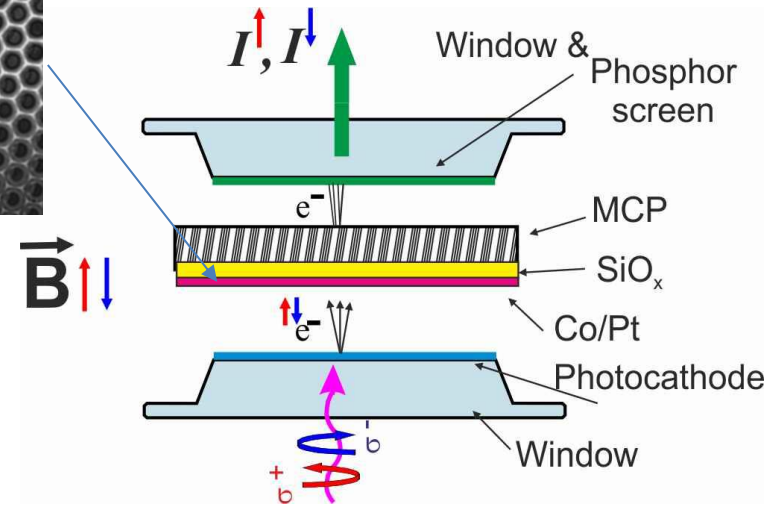
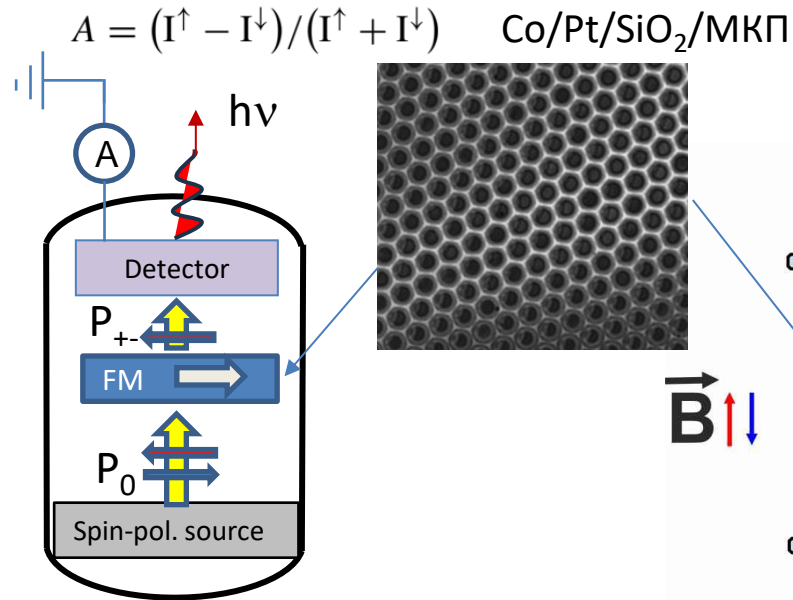
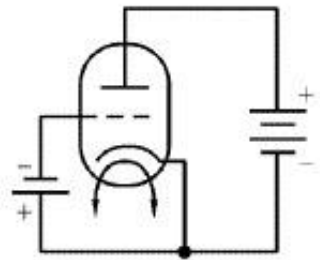
Nano Lett. 2017, 17, 4, 2146–2151

- ✓ The operating frequency is up to 10^{12} Hz ;
- ✓ low noise level;
- ✓ high radiation resistance;
- ✓ immediately ready for operation;
- ✓ wide operating temperature range;
- ✓ exponentially high steepness of the volt-ampere characteristics.

Где вакуумная и твердотельная спинтроника могут работать вместе:



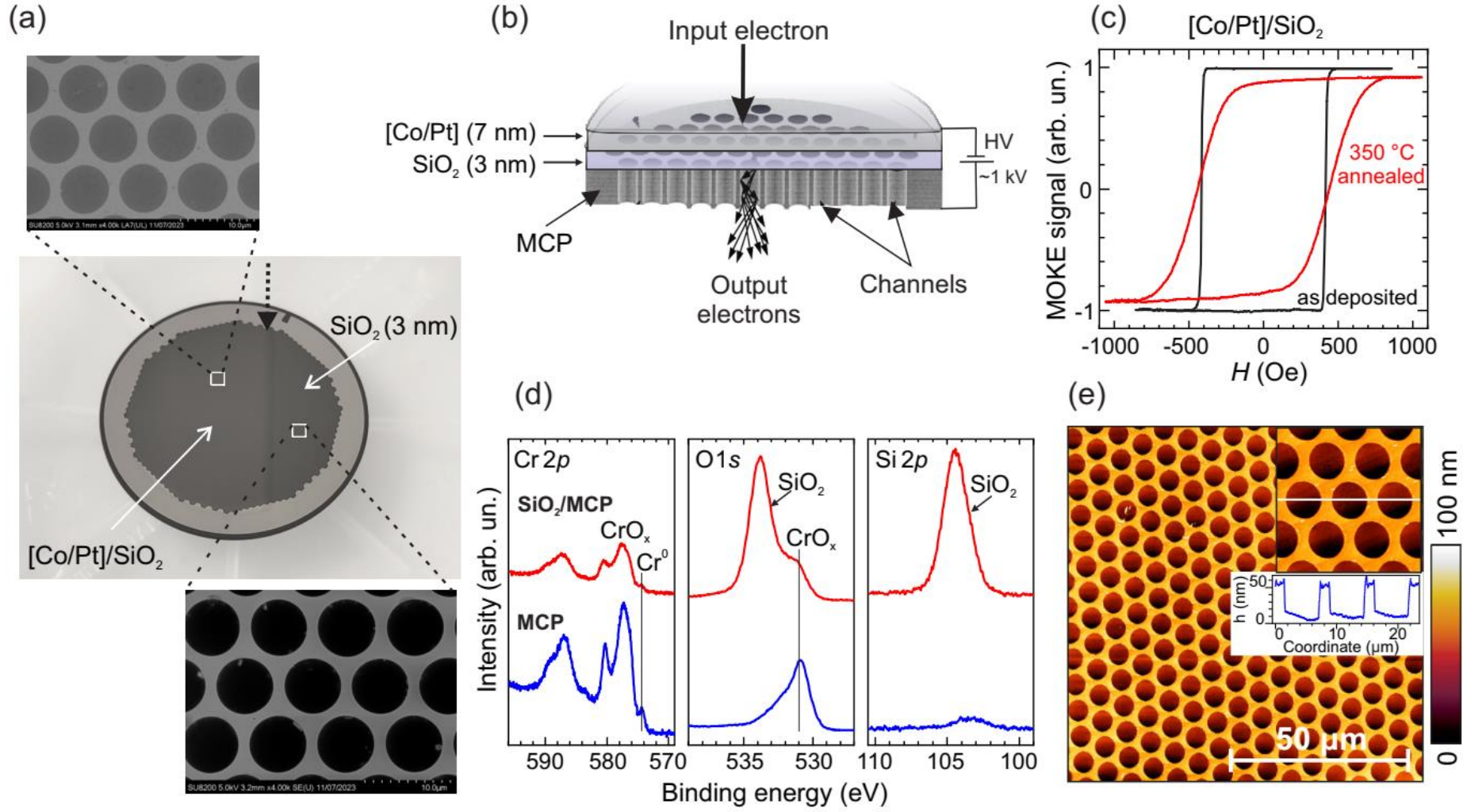
Spintron as an analog of triode = Спиновый триод (спинтрон)



Direct spin imaging detector based on freestanding magnetic nanomembranes with electron optical amplification

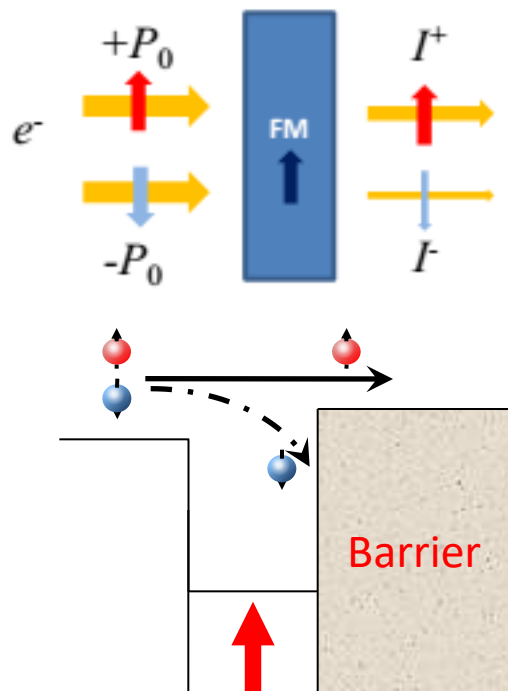
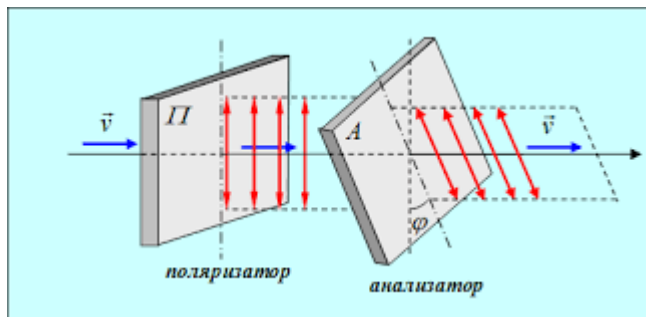
([arXiv:2409.13543](https://arxiv.org/abs/2409.13543))

Изготовление магнитных нано-мембран: **3-5 нм Co/Pt / SiO₂ (3 нм)**

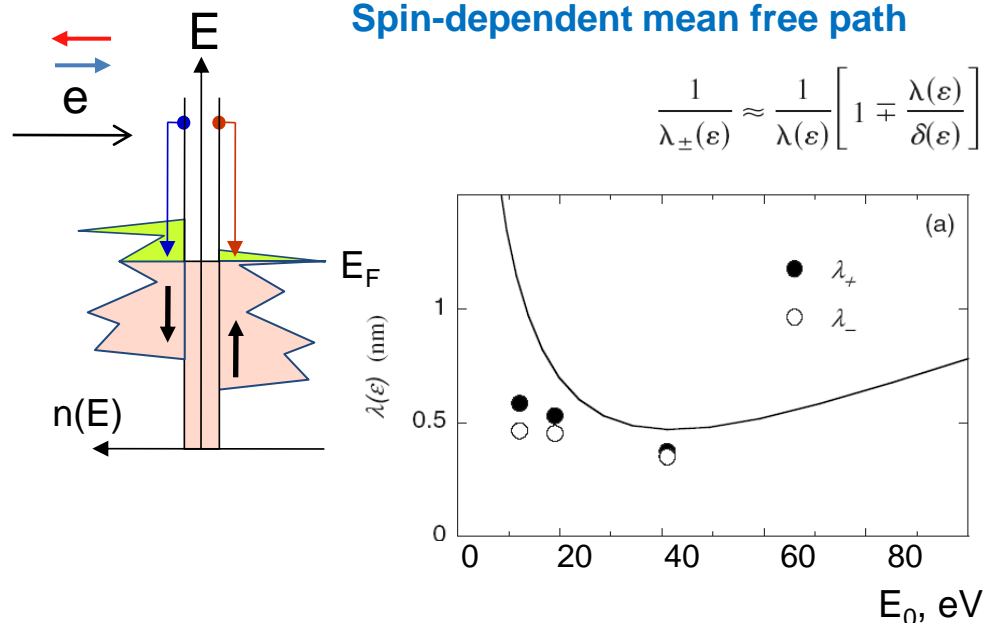


Spin Filtering of Free Electrons by Magnetic Layers

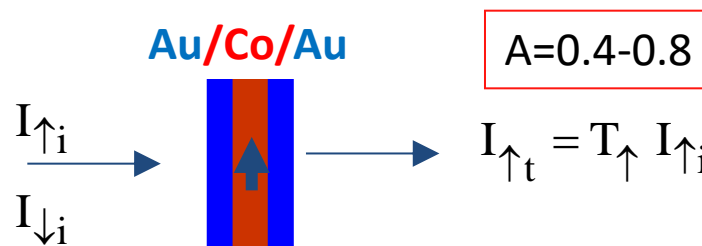
Idea of the spin-filter similar to an optical linear polarizer



Spin selection → Energy barrier



D.P. Pappas, et al. PRL 66 (1991) 504

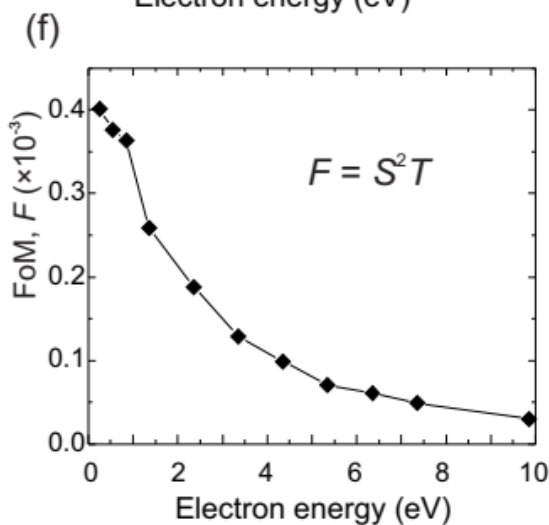
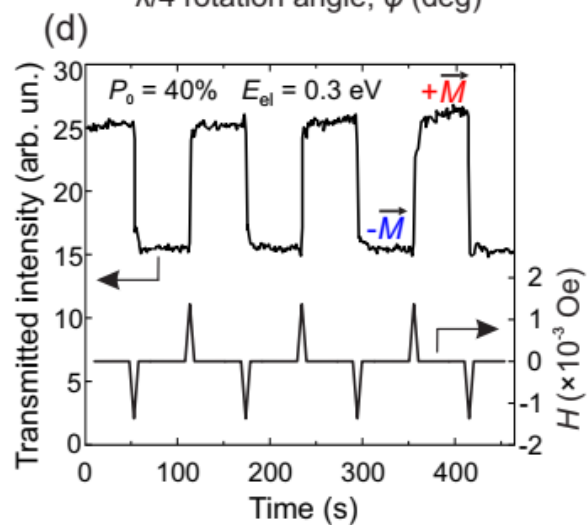
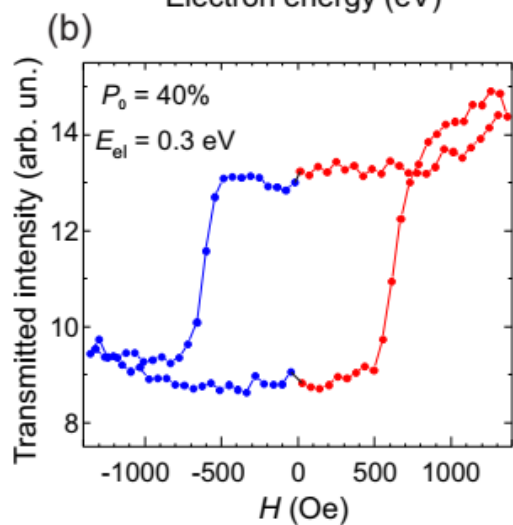
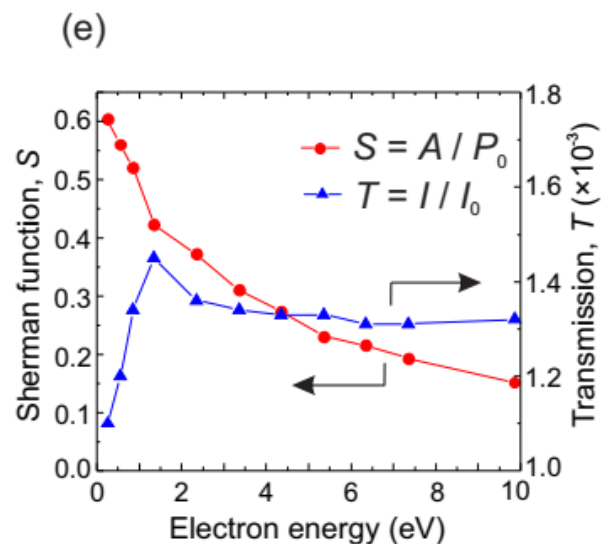
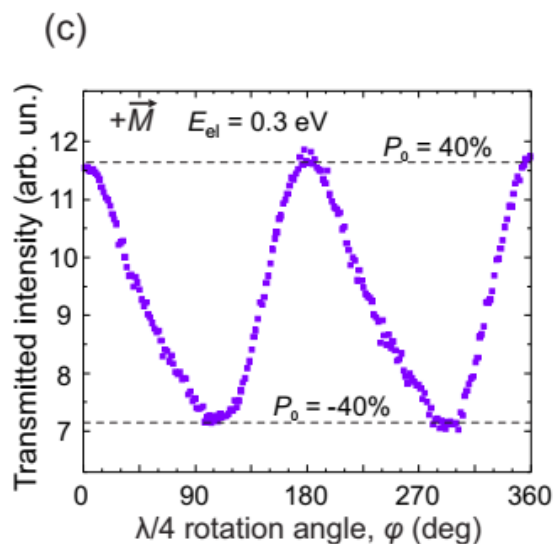
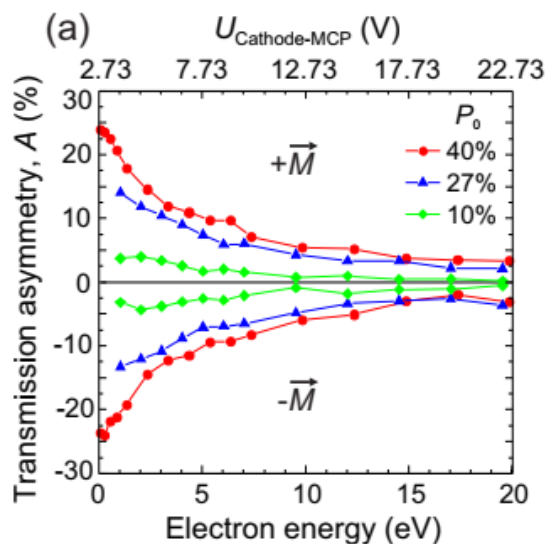
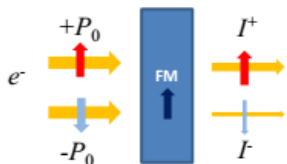


Free-standing spin filters
(spin-dependent transmission in magnetic thin films)

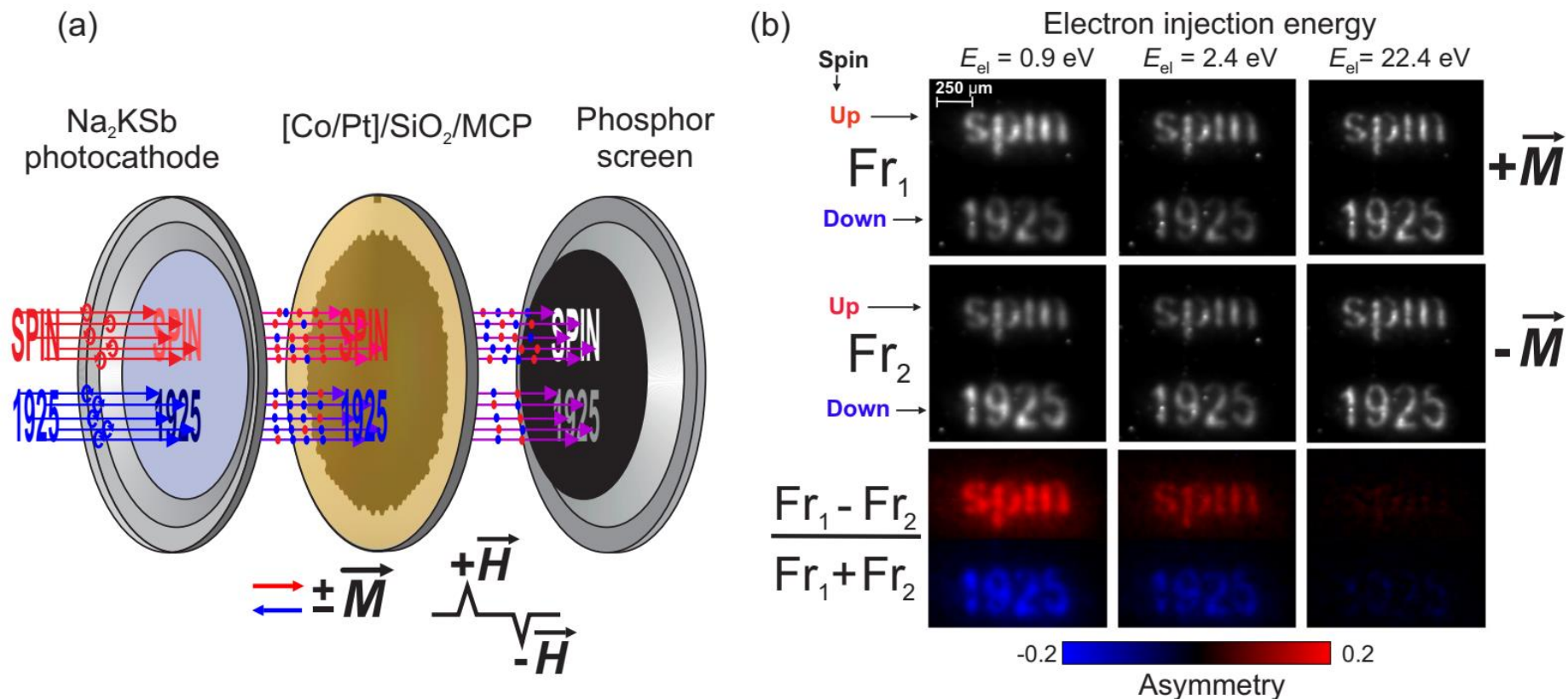
D. Oberli, et al. PRL 81 (1998) 4228

C. Cacho, et al. PRL 88 (2002) 066601

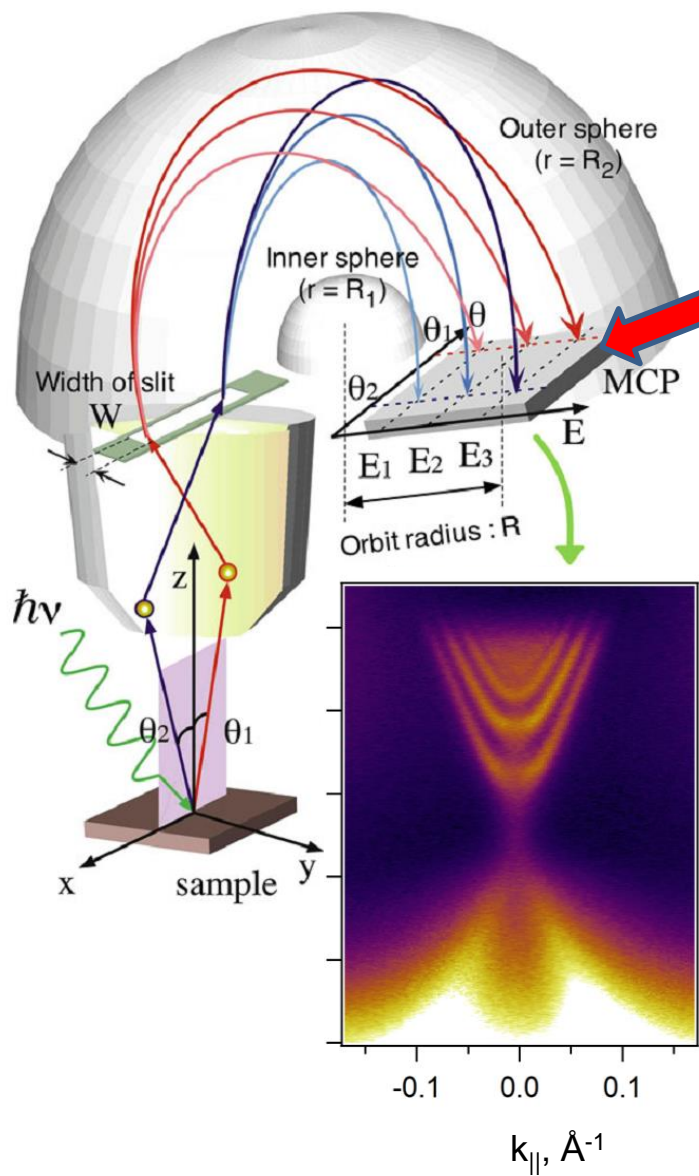
Direct spin imaging detector based on freestanding magnetic nanomembranes with electron optical amplification



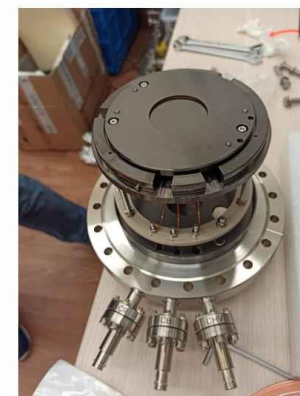
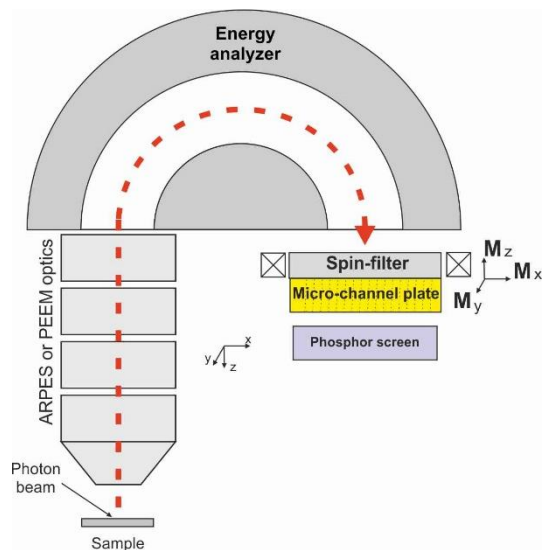
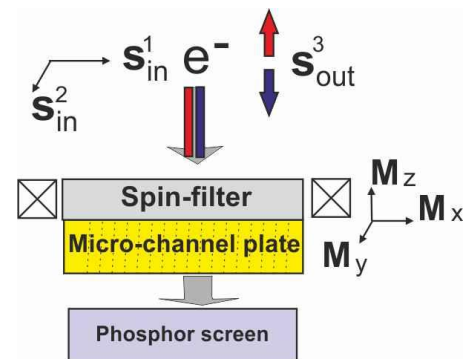
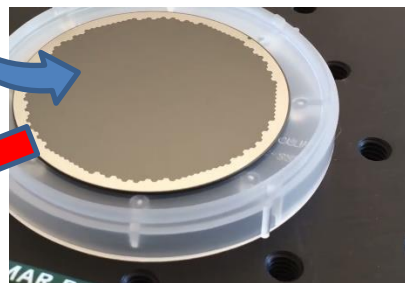
Direct spin imaging detector based on freestanding magnetic nanomembranes with electron optical amplification



Пространственное разрешение спиновой поляризации: второй эволюционный виток в развитии ARPES



FM-nanomembrane/MCP





Станция 1-6: «Электронная структура»

Spin-ARPES

Parameters:

- Energy range 10 – 2000 eV
- Insertion device – Undulator
- Monochromator – PGM

Задачи:

1. РФЭС ВД (отв. Бухтияров А.В. – ИК СО РАН)

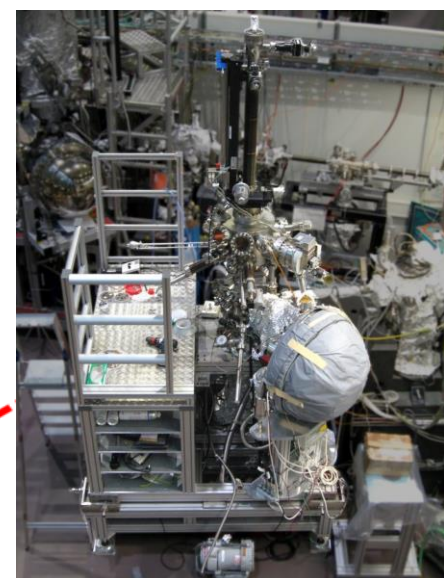
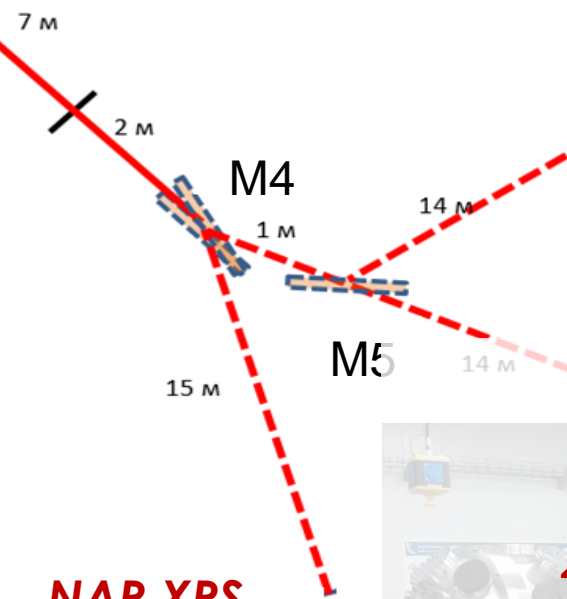
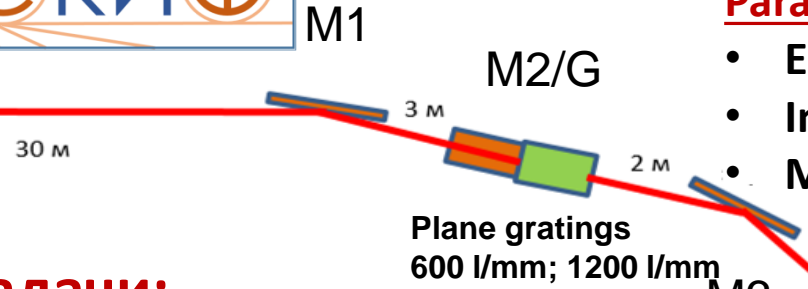
- *In situ* и *operando* исследования каталитических систем
- *Ex situ* и *in situ* изучение широкого класса инновационных функциональных материалов

2. ФЭС УР (отв. Терещенко О.Е., Голяшов В.А. – ИФП СО РАН)

- Исследования зонного спектра и спиновой структуры твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники

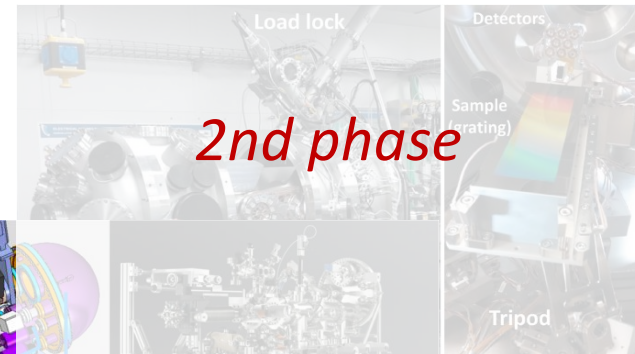
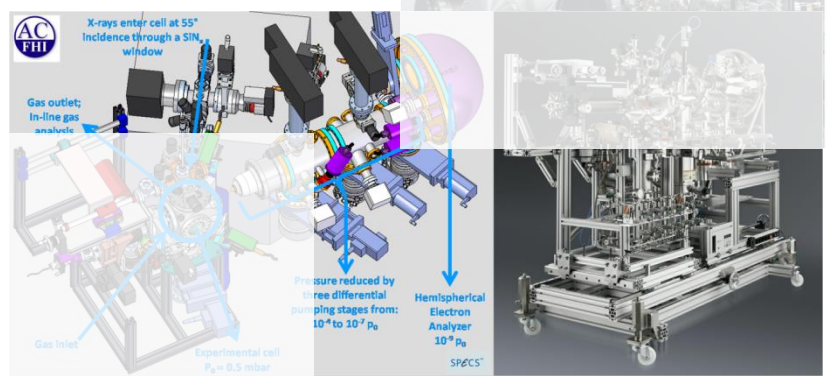
3. Рефлектометрия (отв. Николенко А.Д. – ИЯФ СО РАН)

- Аттестация спектральных оптических элементов,



Reflectometer

NAP XPS

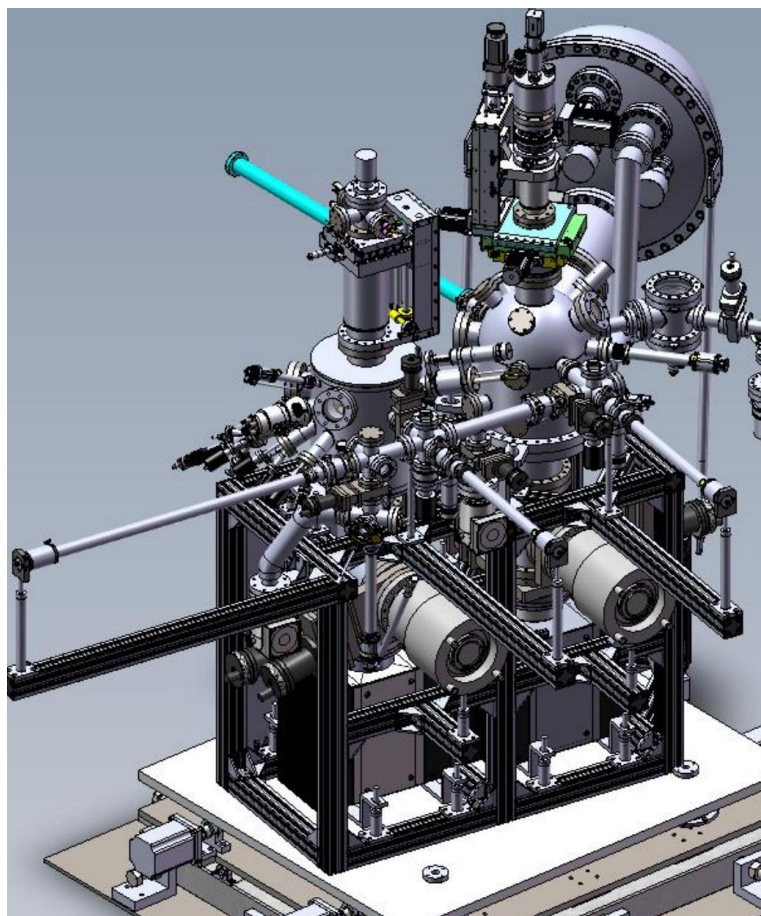


2nd phase

Экспериментальная станция ARPES (ФЭСУР) секции 1-6: «Электронная структура»

- Исследование зонного спектра и спиновой структуры твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники
- Фотоэлектронная дифракция

= “All in one”



1. Spot beam size should be in sub micrometer size range, i.e. we plan to build Nano-ARPES. Probably the simplest way is to use capillary mirror optic. Ref. points. + SEM

2. Sample temperature should be 4 K and below. This is a question of manipulators and cooling systems and probably cooling of the entrance lenses of analyzer . Manipulator stabilization.

3. Total resolution should be 1 meV , and better less.

4. Spin polarization detection. This is a complex task that we will discuss in the near future. *At present, we would like to buy the detector flange with a single channel for the Mott detector and ARPES window as now.*

5. Photoelectron diffraction. As we already discussed, it could be useful to have ARXPS based on Astraios with a wider acceptance total angle (for high kin. energy).

Article

Build-up and dephasing of Floquet–Bloch bands on subcycle timescales

Nature 616, 696 (2023)

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05850-x>

S. Ito^{1,7}, M. Schüler^{2,3,7}, M. Meierhofer⁴, S. Schlauderer⁴, J. Freudenstein⁴, J. Reimann¹,
D. Afanasiev⁴, K. A. Kokh⁵, O. E. Tereshchenko⁵, J. Gädde¹, M. A. Sentef^{6,8},
U. Höfer^{1,4,8} & R. Huber^{4,8}

Received: 21 March 2022

Accepted: 15 February 2023

Article

Tunable non-integer high-harmonic generation in a topological insulator

Nature 593, 385 (2021)

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03466-7>

C. P. Schmid¹, L. Weigl¹, P. Grössing², V. Junk², C. Gorini^{2,7}, S. Schlauderer¹, S. Ito²,
M. Meierhofer¹, N. Hofmann¹, D. Afanasiev¹, J. Crewse², K. A. Kokh^{4,5}, O. E. Tereshchenko^{5,6},
J. Gädde², F. Evers², J. Wilhelm^{2,8}, K. Richter^{2,8}, U. Höfer² & R. Huber^{1,8}

Received: 28 August 2020

Accepted: 17 March 2021

LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0544-x>

Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band

Nature 562, 396 (2018)

J. Reimann¹, S. Schlauderer², C. P. Schmid², F. Langer², S. Baierl², K. A. Kokh^{3,4}, O. E. Tereshchenko^{4,5}, A. Kimura⁶, C. Lange²,
J. Gädde¹, U. Höfer^{1*} & R. Huber^{2*}

Планы:

Спин-поляризованные источники и детекторы электронов В

исследования резонансного рассеяния электронов

Проект РФФ: *Природа хиральной асимметрии на молекулярном уровне в исследованиях резонансного рассеяния спин-поляризованных электронов*

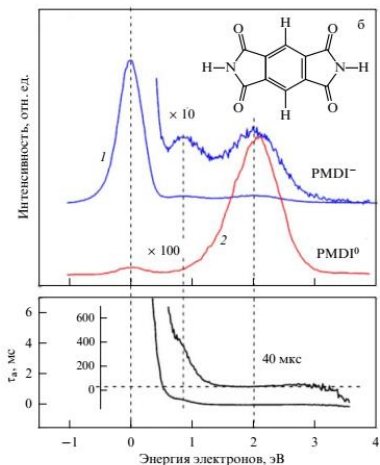
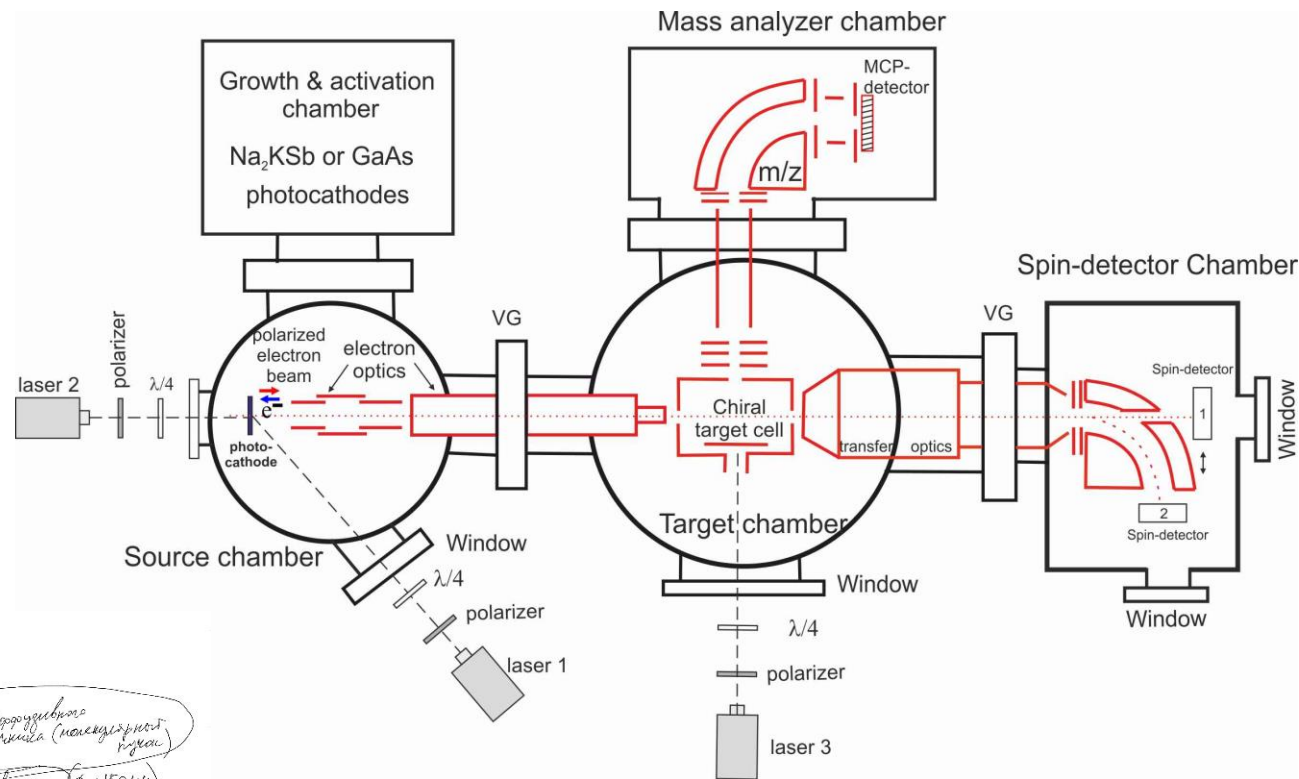
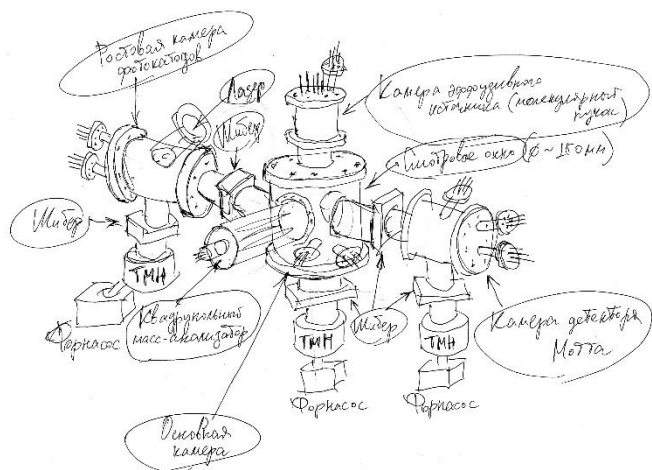


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Токи ОМИ (синяя линия 1), сигнал нейтральной компоненты (красная линия 2) и полученные по формуле (5) величины (τ_0) для (а) фталмида (PDI) при температуре стенок камеры ионизации 90°C и (б) пиромеллитового диметила (PMDI) при 190°C в зависимости от энергии электронов. Приведена также кривая для (τ_0) ОМИ PDI, зарегистрированная при температуре 190°C, для сравнения с аналогичной зависимостью в PMDI.



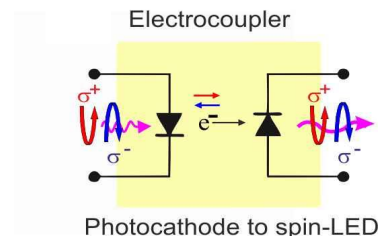
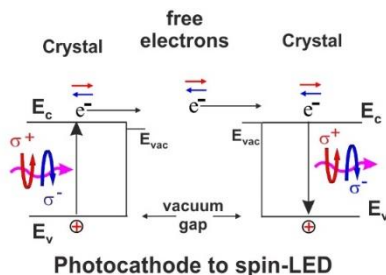
Спектроскопия диссоциативного захвата (спин-поляризованных) электронов

Междисциплинарный: Институт физики молекул и кристаллов, Уфа



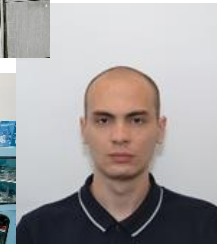
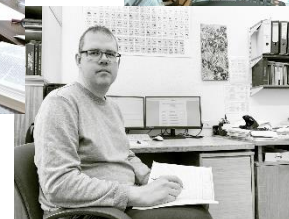
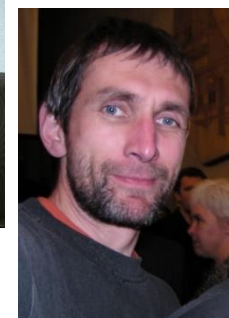
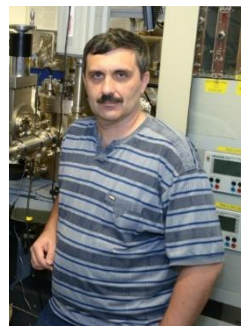
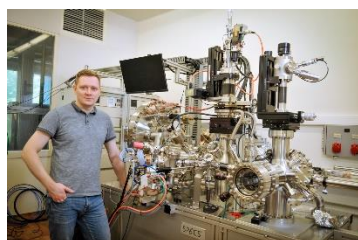
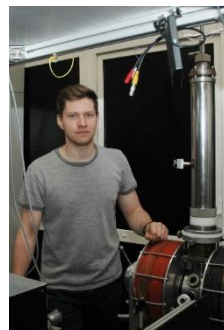
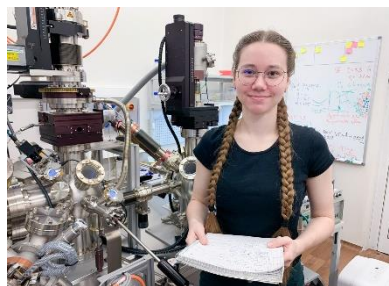
Заключение

- Развитие научного направления происходит наиболее интенсивно, если знания рождают технологии, которые заканчиваются прибором, позволяющим изучать физику.
- Развитие вакуумной спинтроники в области создания новых спин-детектируемых устройств способствует развитию твердотельной спинтроники. Интересной идеей, кажется, реализация т.т. спин-зависимых устройств с вакуумным зазором.



- ✓ SKИФ: Задача построить современную фотоэмиссионную станцию с угловым и спиновым разрешением (SR ARPES) с предельными параметрами (разрешение (1 мэВ), поляризация, температура (< 4 K), размер пучка < 1 мкм).
- В планах:
 - эксперимент по спин-зависимому рассеянию e^- на хиральных молекулах;
 - изучение углового орбитального момента электронов;
 - квантовая запутанность на поляризованных электронах (неравенства Белла)

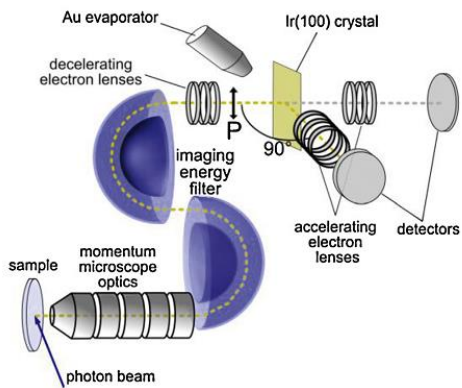
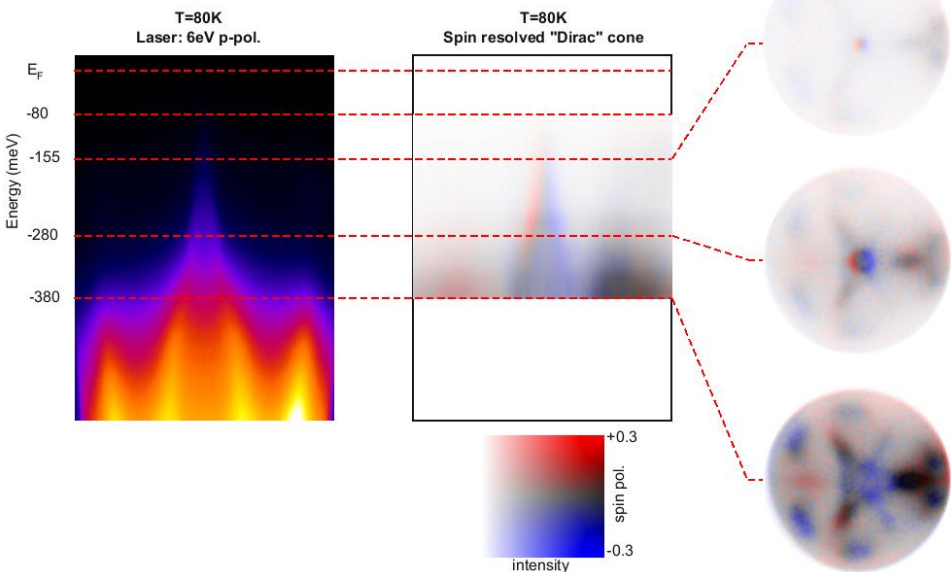
Лаборатория физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН



Фотоэмиссионные измерения

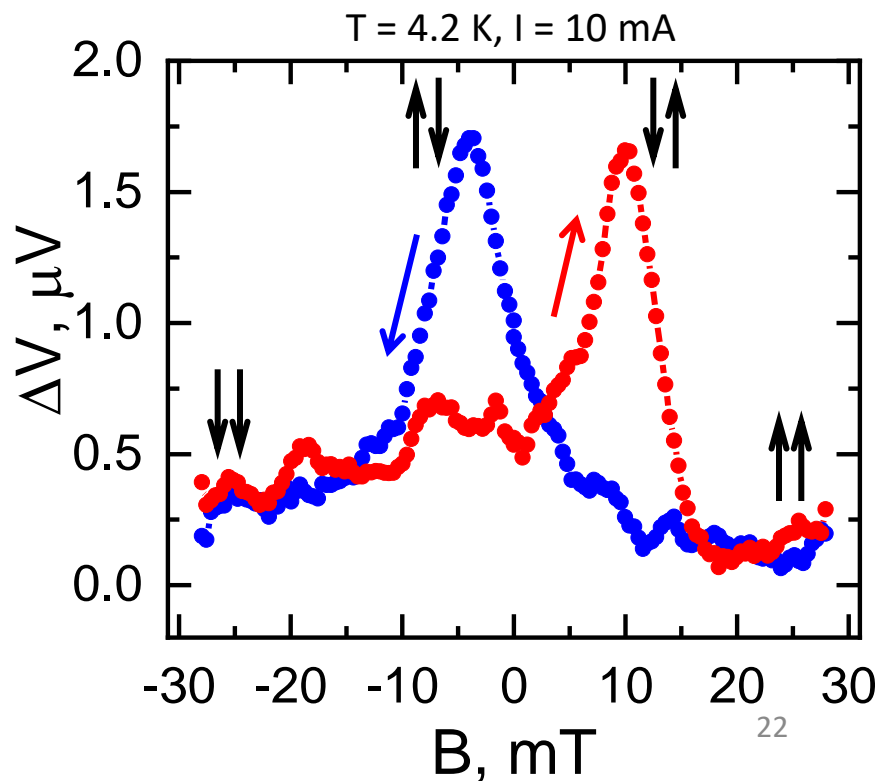
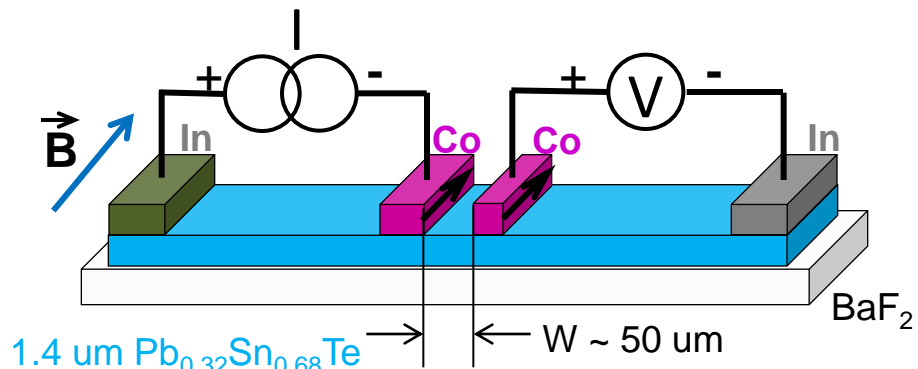
Спиновая структура PbSnTe

Spin-ARPES



Транспортные измерения

Спиновая аккумуляция



Совместно с ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН , Philipps-University of Marburg (Germany)

Дираковские токи, индуцированные электромагнитной волной, в топологической поверхностной зоне с субпериодным разрешением

LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03466-7>

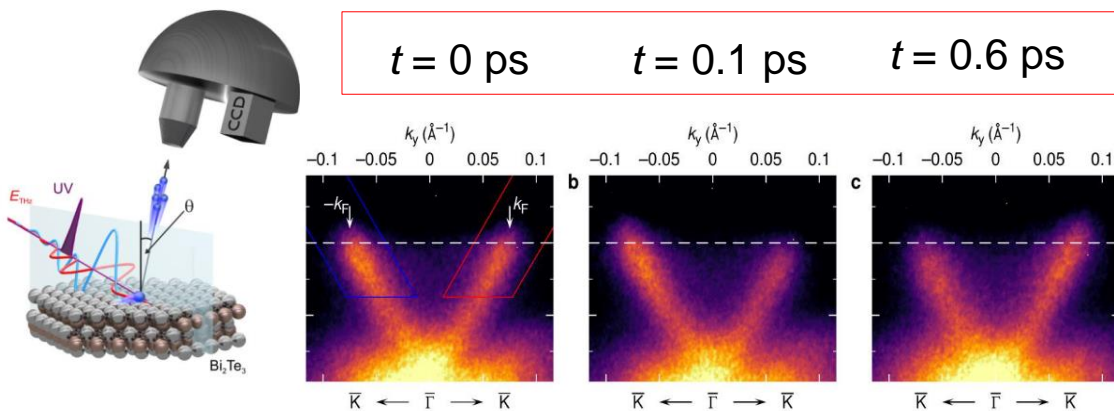
Nature (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03466-7

Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band

J. Reimann¹, S. Schlauderer², C. P. Schmid², F. Langer², S. Baierl², K. A. Koh^{3,4}, O. E. Tereshchenko^{4,5}, A. Kimura⁶, C. Lange², J. Güdde¹, U. Höfer^{1*} & R. Huber^{2*}

Nature 562, 396 (2018), IF= 45.819

Впервые проведено исследование процесса фотоэмиссии с угловым и субпериодным временным разрешением. Это позволило наблюдать процесс ускорения фермионов Дирака, вызванный терагерцовой (ТГц) электромагнитной волной, в квазирелятивистской дисперсионной зоне топологического поверхностного состояния Bi_2Te_3 .



- ❖ Впервые показано, что благодаря высокой Ферми скорости, малому рассеянию и линейному закону дисперсии, ускоренные электромагнитной волной фермионы Дирака могут баллистически распространяются в бездисперсионных волновых пакетах на расстояния до нескольких 100 нм. Эта рекордная дистанция значительно превышает ширину затвора современных транзисторов.



On the origins of life's homochirality: Inducing enantiomeric excess with spin-polarized electrons

S. Furkan Ozturk¹ and Dimitar D. Sasselov¹

Edited by Ron Naaman, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel; received March 21, 2022; accepted May 5, 2022 by Editorial Board Member Joanna Aizenberg

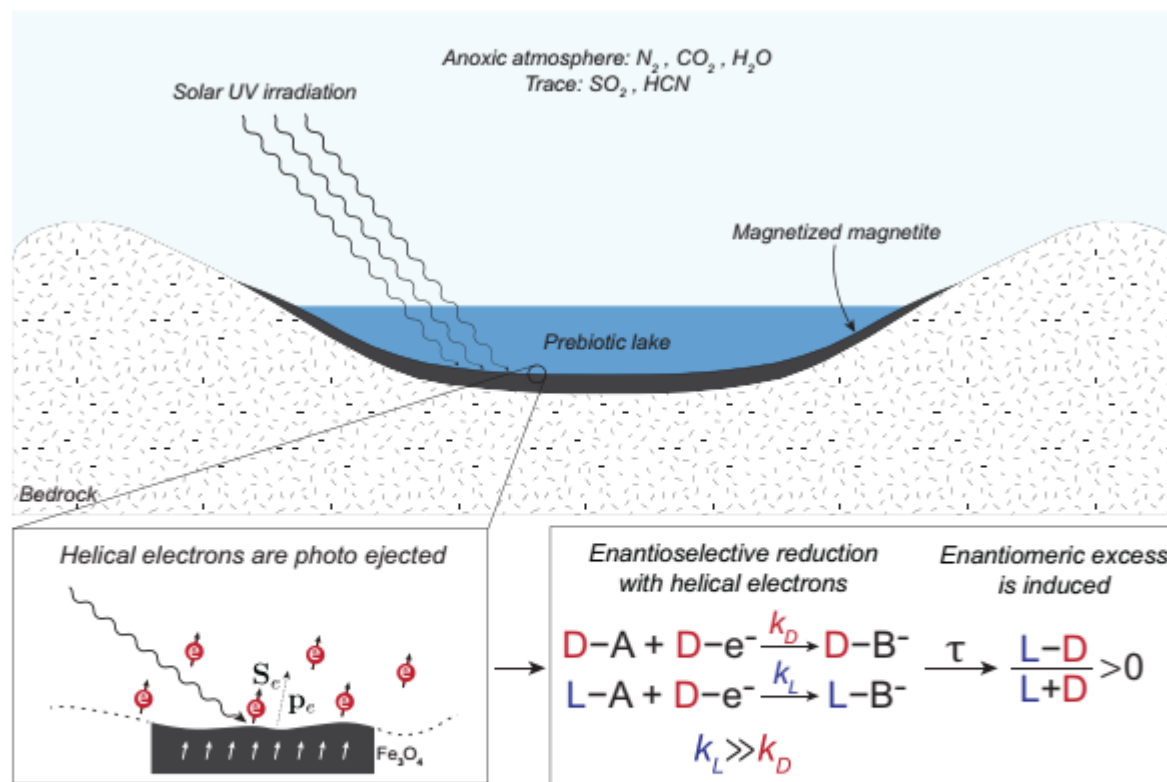


Fig. 1. An evaporative lake with magnetite deposits contains the feedstock molecules for prebiotic chemistry. Irradiation of the uniformly magnetized magnetite (Fe_3O_4) deposits with solar UV (200- to 300-nm) light generates helical photoelectrons. The helicity of the electrons (D-e⁻ in the figure as the spin and momentum are parallel to each other) is determined by the magnetization direction (section 3 discusses what is meant by the electron helicity). Helical electrons induce CDRC near the magnetite surface due to a selectivity in the reaction rates, k_L and k_D , for different isomers L and D, respectively. This selectivity in the reaction rates can induce an imbalance between two isomers. In the figure, ee in the L isomer is induced.

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

Solar energy converters based on multi-junction photoemission solar cells

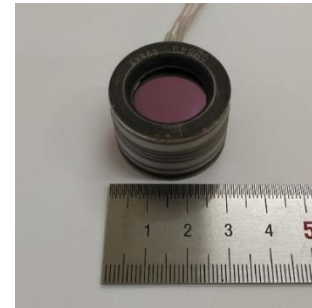
Received: 7 July 2017

Accepted: 13 November 2017

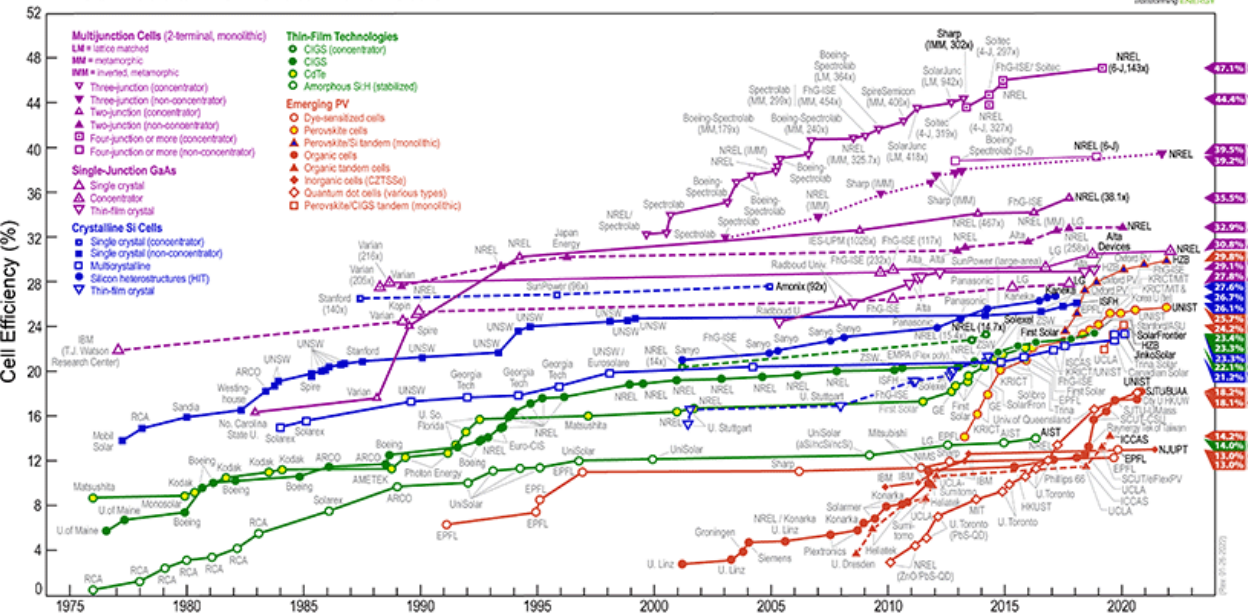
Published online: 23 November 2017

O. E. Tereshchenko^{1,2}, V. A. Golyashov², A. A. Rodionov¹, I. B. Chistokhin¹, N. V. Kislykh³, A. V. Mironov³ & V. V. Aksenov³

PHYSICAL REVIEW APPLIED 8, 034026 (2017)



Best Research-Cell Efficiencies



le



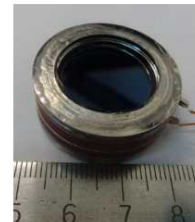
НОВОСТИ · СО РАН СЕГОДНЯ · КОНТАКТЫ · ПЕЧАТНАЯ ВЕРСИЯ · РЕКЛАМА · С
Наука для общества Образование Организация науки Просто о сложном Мнения Инфраструктура

Сибирские ученые сделали эффективный вакуумный фотодиод для солнечных батарей

23 ноября 2017

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН совместно с ЗАО «Экран ФЭП» создали новый тип вакуумного фотодиода, который позволяет эффективно преобразовывать свет в электричество и перспективен для использования в солнечной энергетике, особенно при размещении устройств в космосе. Результаты этой работы опубликованы в журнале Scientific Reports.

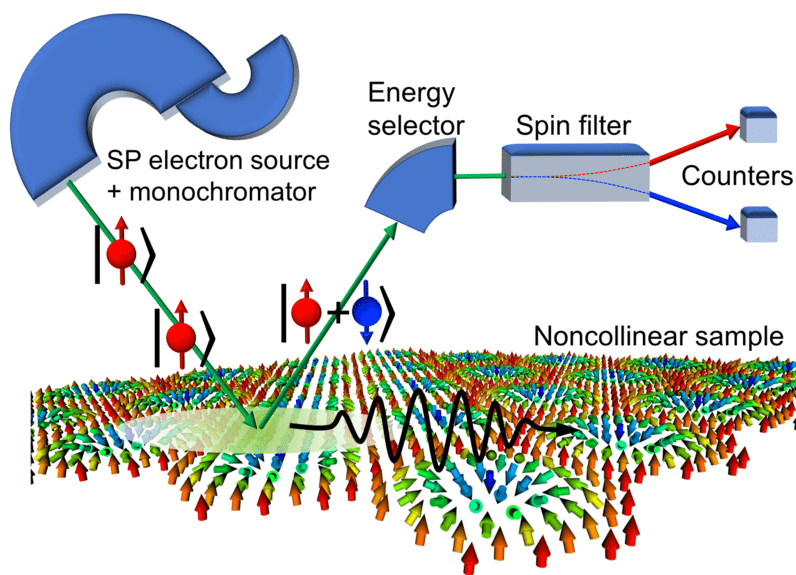
При преобразовании света в электричество есть две проблемы: как выбить много электронов и как собрать и заставить их двигаться в определенном направлении (в противном случае, если электроны мечутся по полупроводнику бесцельно, он просто нагревается). В настоящее время наиболее эффективны многоскадные полупроводниковые преобразователи. Сибирские ученые предложили использовать вакуумный фотодиод. Его отличие в том, что полупроводниковые электроды не соприкасаются, а находятся на определенном расстоянии друг от друга в вакууме, это позволяет взять анод независимо от катода, то есть сделать их структуру и состав, не ориентируясь на то, как они будут соприкасаться



Применение источников спин-поляризованных электронов в научно-приборном хозяйстве

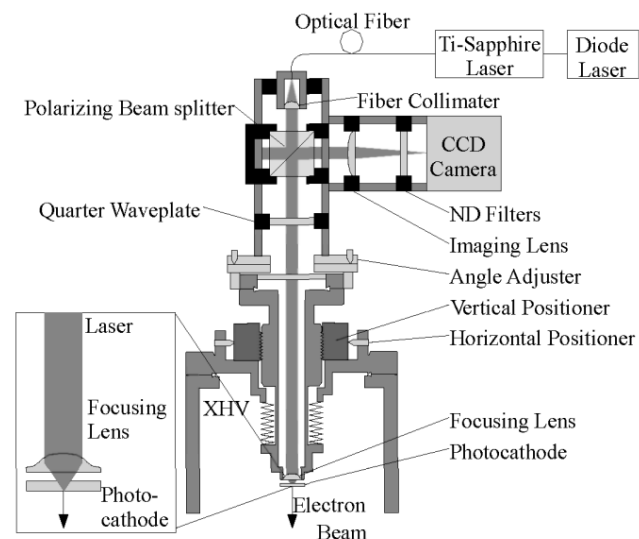
Спин-поляризованная спектроскопия
характеристических потерь энергии
электронов высокого разрешения

SPIN-POLARIZED ELECTRON ENERGY LOSS
SPECTROSCOPY (SPEELS)



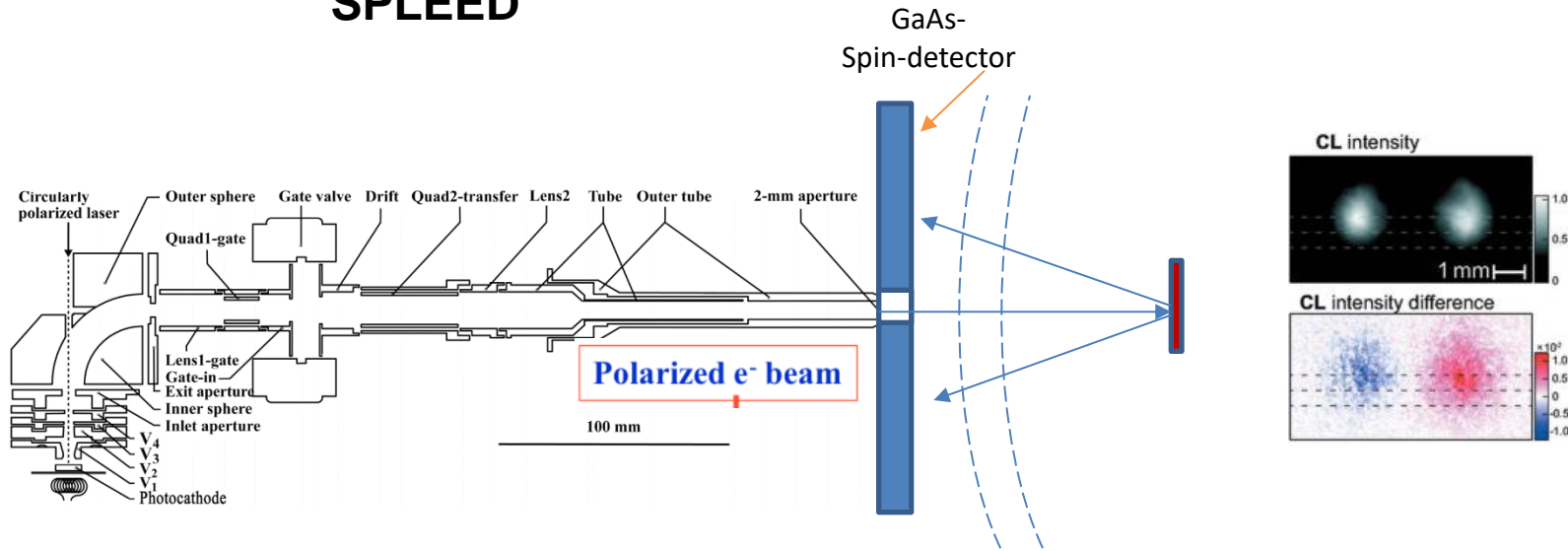
Спин-поляризованный
электронный микроскоп

SPIN-POLARIZED LOW-ENERGY ELECTRON
MICROSCOPY (SPLEEM)

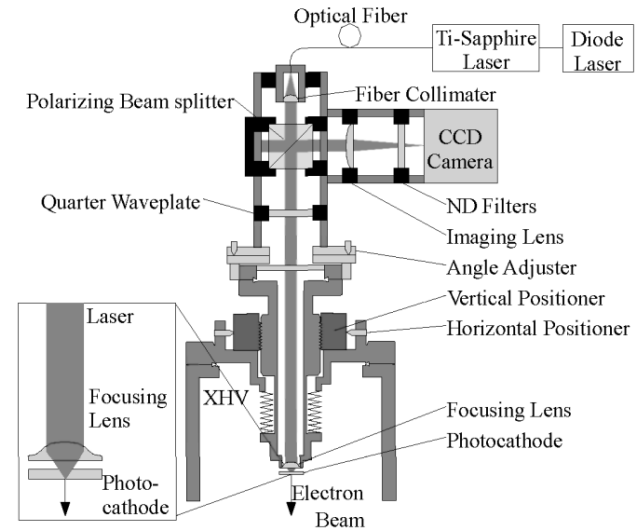
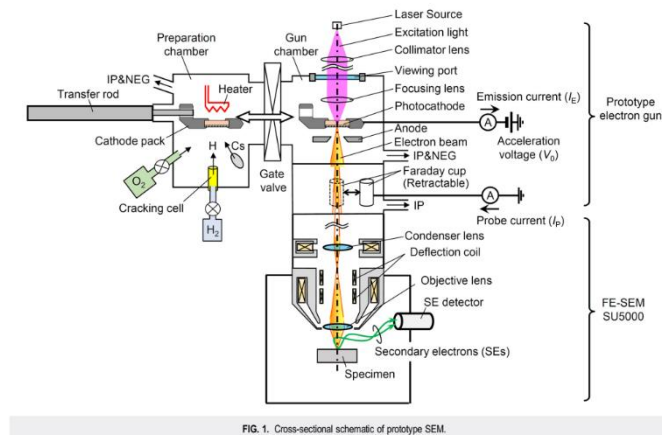


Спин-поляризованная дифракция медленных электронов

SPLEED

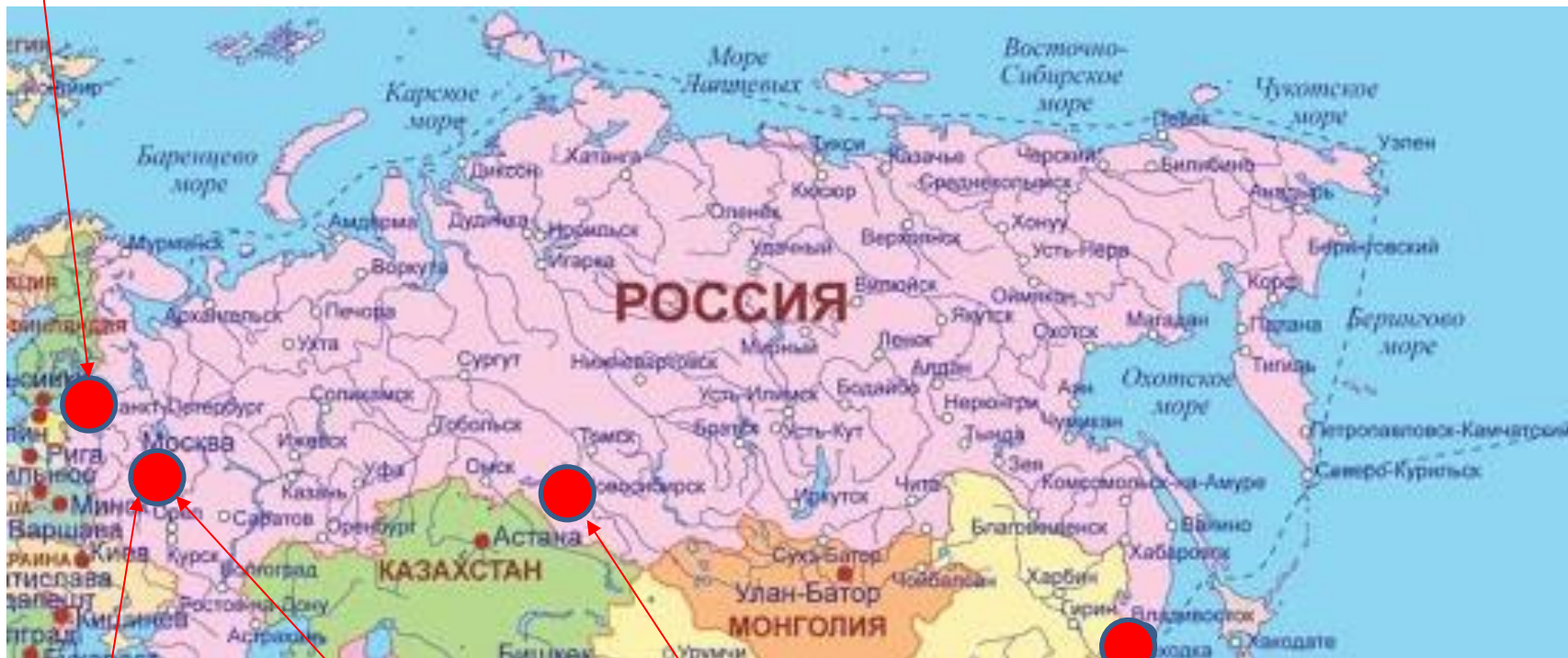


Спин-поляризованный сканирующий электронный микроскоп



Карта ARPES (ФЭСУР) в России

СПБГУ



ФИАН*

Курчатовский
институт*

ИФП СО РАН (2021)

ИАПУ ДВО РАН