

## New Spin-Polarized Electron Source Based on Alkali Antimonide Photocathode

V. S. Rusetsky<sup>1,2</sup>, V. A. Golyashov<sup>1,3,4</sup>, S. V. Ereemeev<sup>5</sup>, D. A. Kustov<sup>1</sup>, I. P. Rusinov<sup>6</sup>, T. S. Shamirzaev<sup>1,4</sup>,  
A. V. Mironov<sup>2</sup>, A. Yu. Demin<sup>2</sup> and O. E. Tereshchenko<sup>1,3,4,\*</sup>

<sup>1</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia

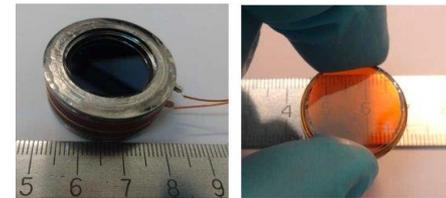
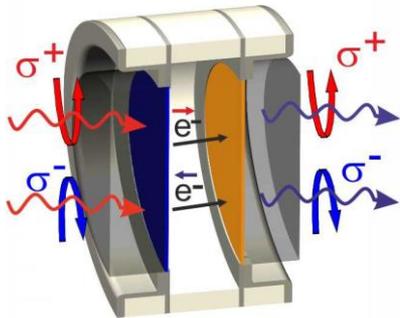
<sup>2</sup>CJSC "Ekran FEP", Novosibirsk 630060, Russia

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

<sup>4</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090 Russia

<sup>5</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk 634055, Russia

<sup>6</sup>Tomsk State University, Tomsk 634050, Russia



План доклада:

- Полупроводниковый оптический детектор поляризованных по спину свободных электронов с пространственным разрешением
- Новый источник поляризованных по спину электронов на основе мультищелочных фотокатодов  $\text{Na}_2\text{KSb/Cs}$
- ✓ Спиновый вакуумный фото – светодиод (Spin-VLED)

# Оптический детектор спина свободных электронов на основе полупроводниковых гетероструктур с пространственным разрешением

Впервые создан полупроводниковый спин-детектор с пространственным разрешением. Интегрирование детектора в метод фотоэмиссии с угловым разрешением (ARPES) приведет к увеличению эффективности в  $10^4$ - $10^6$  раз превышающей существующие одноканальные спин-детекторы.

Принцип работы: **инжекция свободных спин-поляризованных электронов в гетероструктуру  $A^3B^5$  и регистрация катодолуминесценции (интенсивность, поляризация)**

Катодолуминесцентное (КЛ) изображение мира с пространственным разрешением  $\leq 5$  мкм

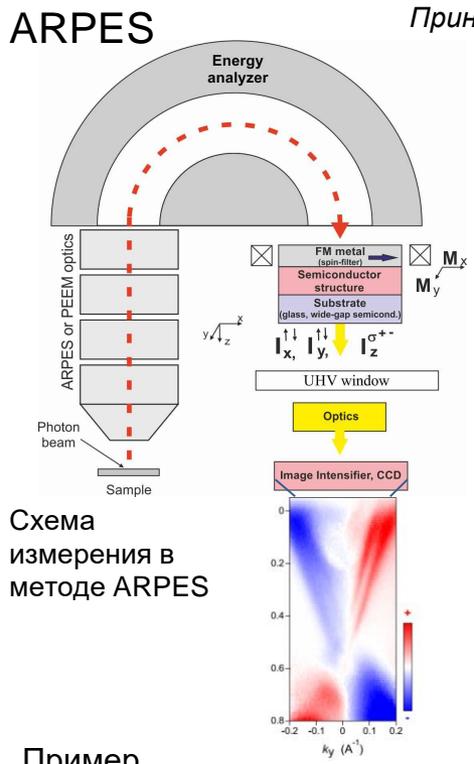
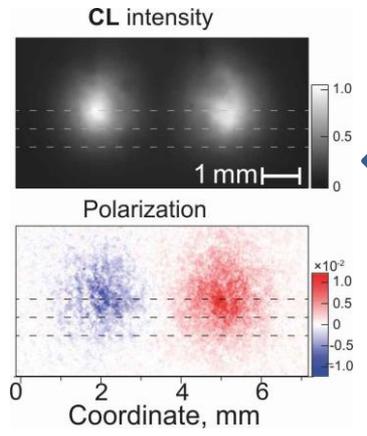


Схема измерения в методе ARPES

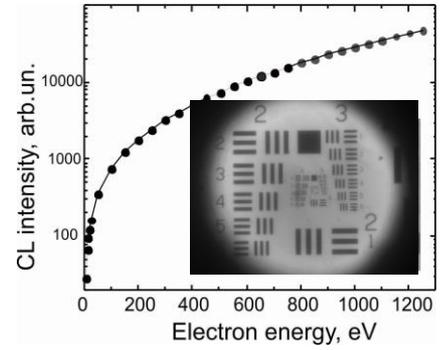
Пример дисперсии Дирака топологического изолятора  $PbBi_4Te_4S_3$

GaAs - детектор

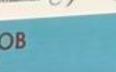
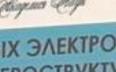
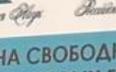


Изображение в КЛ

Впервые измерена картина распределения катодолуминесценции при инжекции двух пучков электронов с противоположными направлениями поляризации по спину в структуру GaAs/AlGaAs



Зависимость интенсивности КЛ от энергии инжектируемых электронов: детектор может работать в интегральной моде ARPES



## 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.

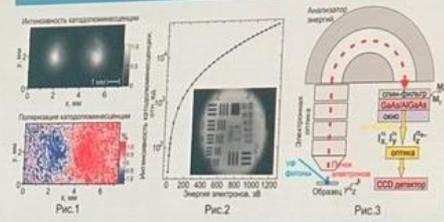
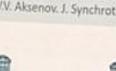


Рис.1. Картины распределения поляризованной катодолюминесценции при инжекции в структуру GaAs/AlGaAs двух пучков спин-поляризованных электронов.  
Рис.2. Зависимость интенсивности катодолюминесценции от энергии электронов, и перенесенное в катодолюминесценцию изображение тестового объекта с пространственным разрешением <5 нмкм.  
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. Ruzetsky, A.V. Mironov, A.Yu. Demin, V.V. Aksenov. I. Synchrotron Rad., v. 28, pp. 864-875 (2021).

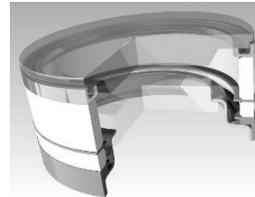
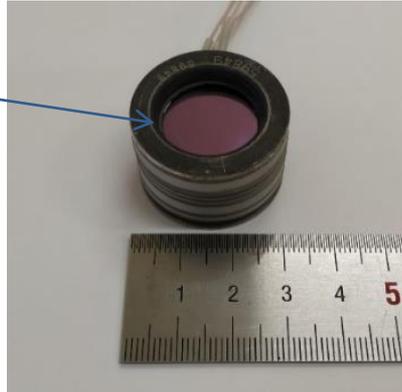


# Спиновый вакуумный фотодиод с полупроводниковыми электродами с эффективным отрицательным электронным средством

**Свойства и применения:**

Спиновый вакуумный фотодиод

100:1



ARPES (установка фотоэмиссии с угловым разрешением)



Изучение фотоэмиссии электронов очень низкой энергии  
Изучение инъекции электронов в полупроводниковые гетероструктуры

Спин-детектор свободных электронов

Фотоэмиссионный солнечный элемент

Scientific Reports 7, 16154, (2017)

Phys. Rev. Appl. 8, (2017) 034026

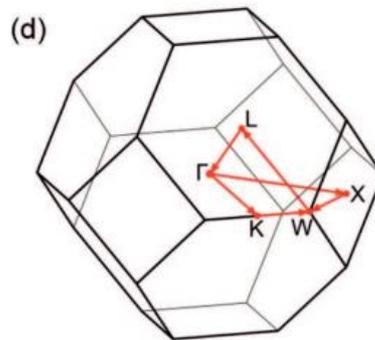
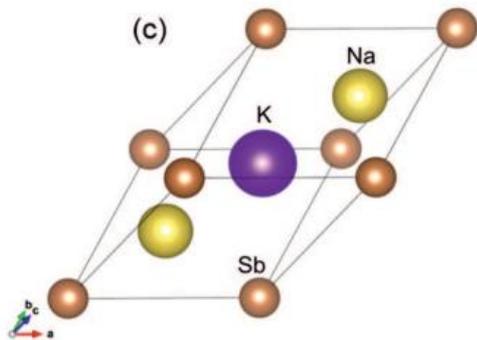
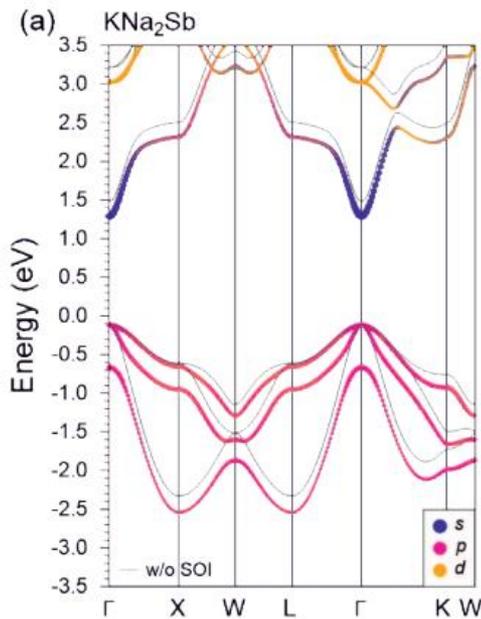
Ultramicroscopy 218 (2020) 113076

J. Synchrotron Rad. (2021) 28

Phys. Rev. Lett. (2022) 129

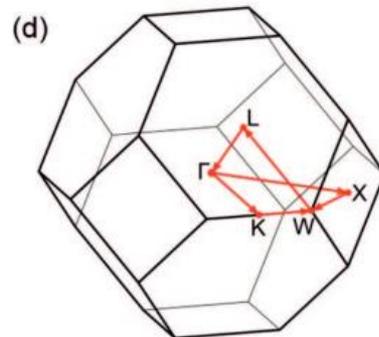
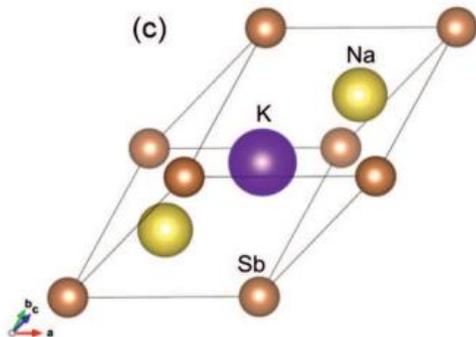
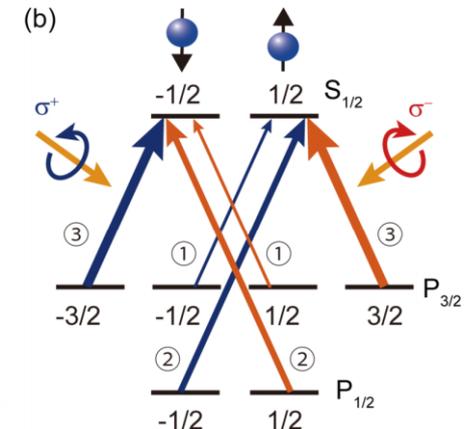
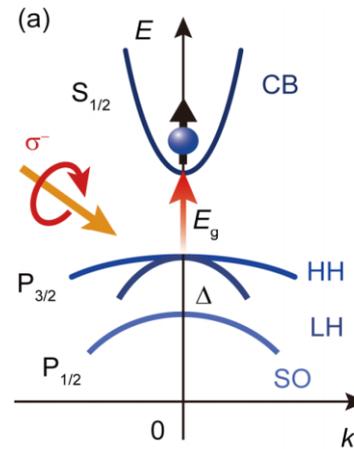
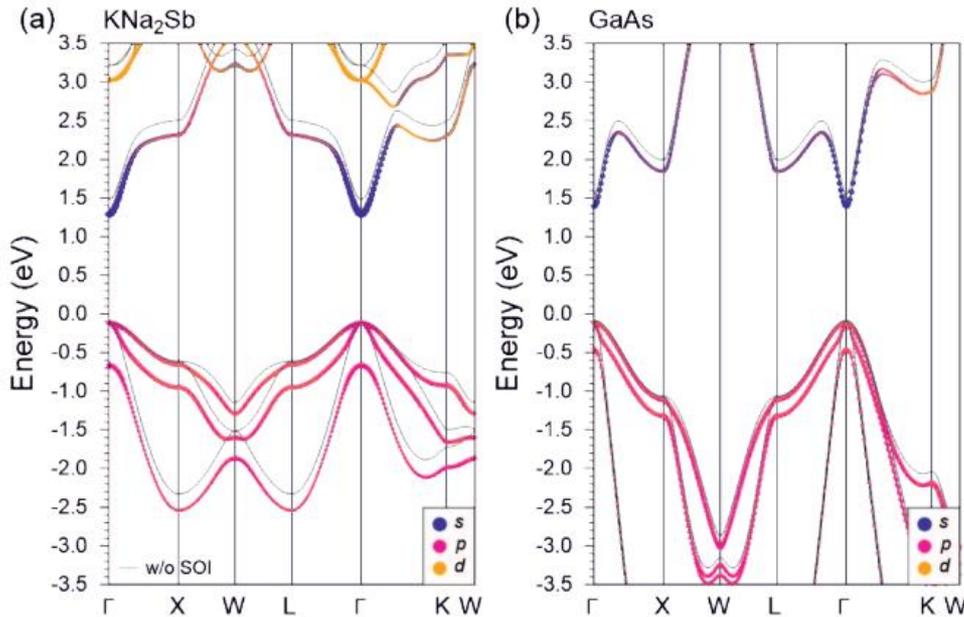
# Новый полупроводниковый источник спин-поляризованных электронов на основе $\text{Na}_2\text{KSb}$

## Зонная структура и эффект оптической ориентации в мультищелочном фотокатоде $\text{Na}_2\text{KSb}$

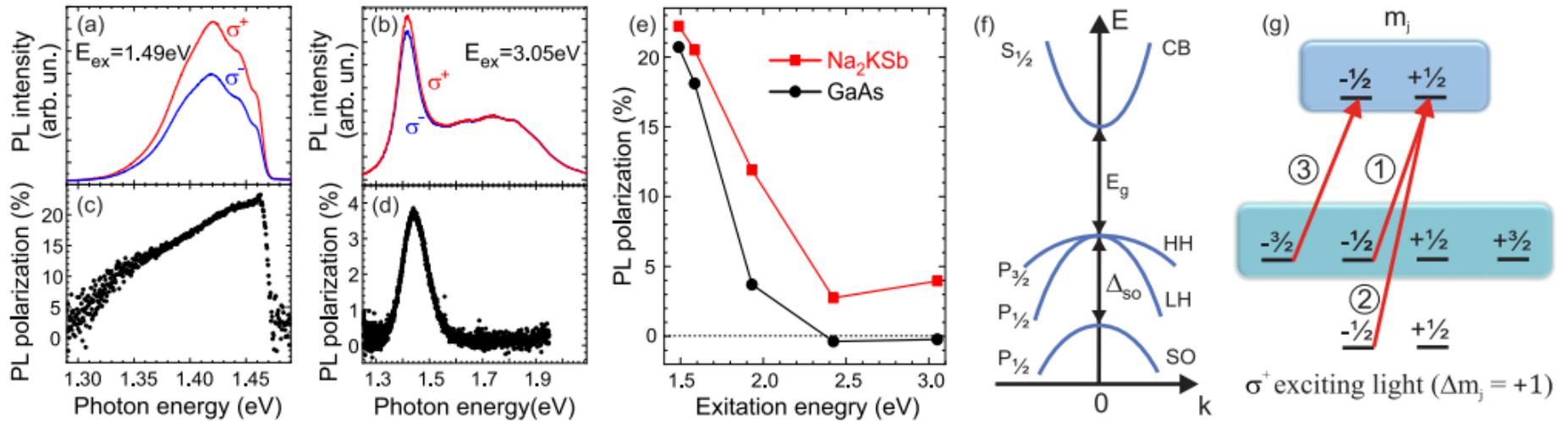


# Новый полупроводниковый источник спин-поляризованных электронов на основе $\text{Na}_2\text{KSb}$

## Зонная структура и эффект оптической ориентации в мультищелочном фотокатоде $\text{Na}_2\text{KSb}$

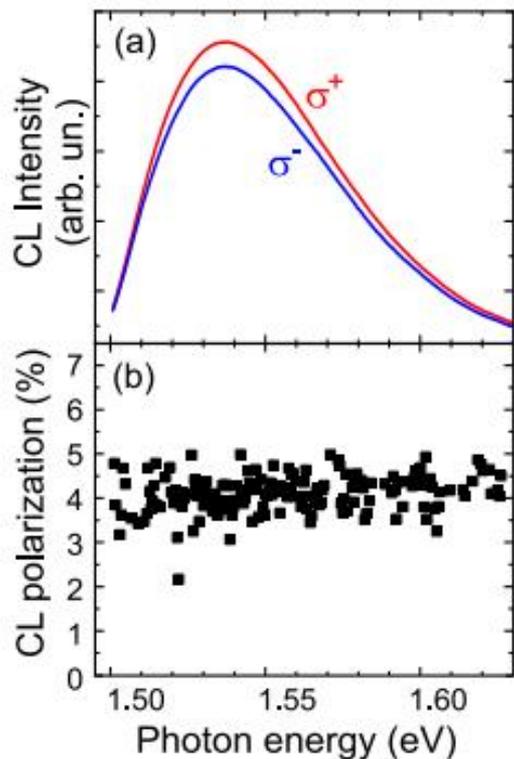


# Эффект оптической ориентации в мультищелочном фотокатоде $\text{Na}_2\text{KSb}$



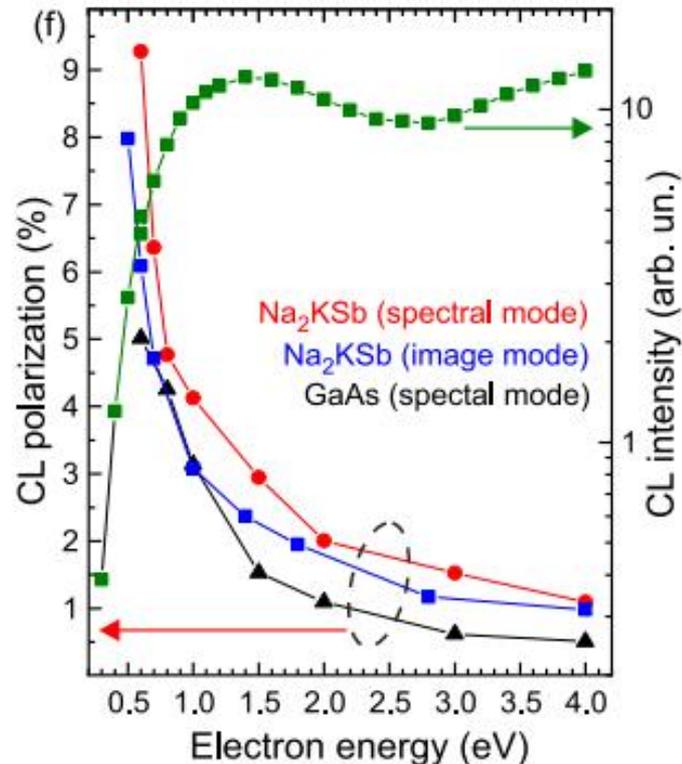
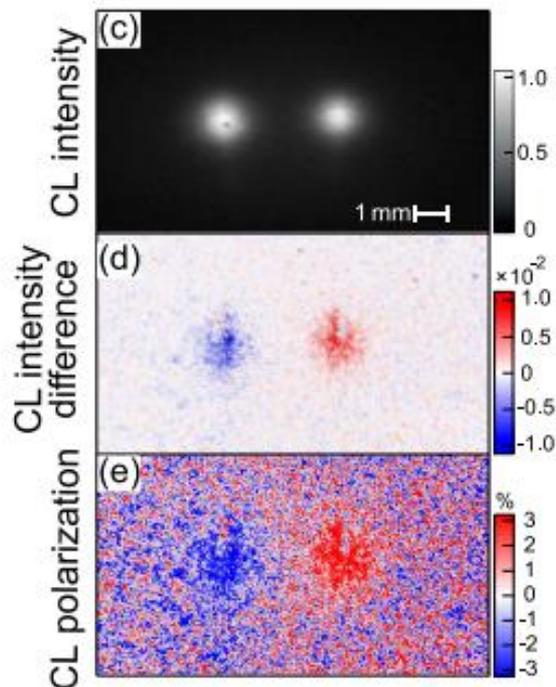
# Спин-поляризованная фотоэмиссия из $\text{Na}_2\text{KSb}$ фотокатода

Спектральная  
катодолюминесценция



Пространственная КЛ

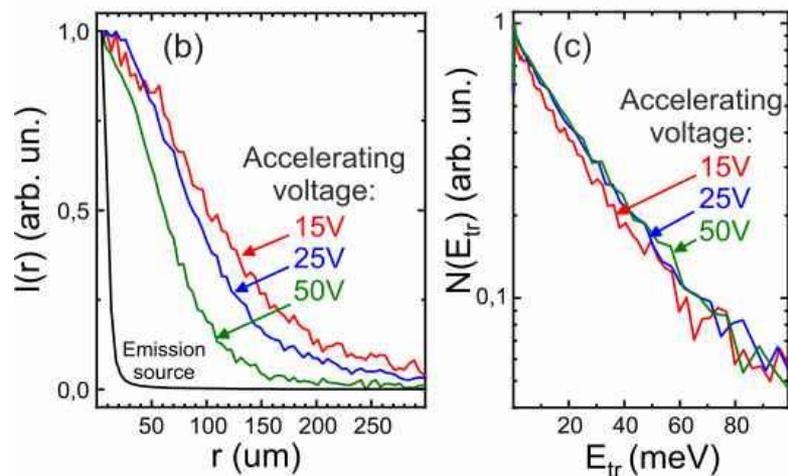
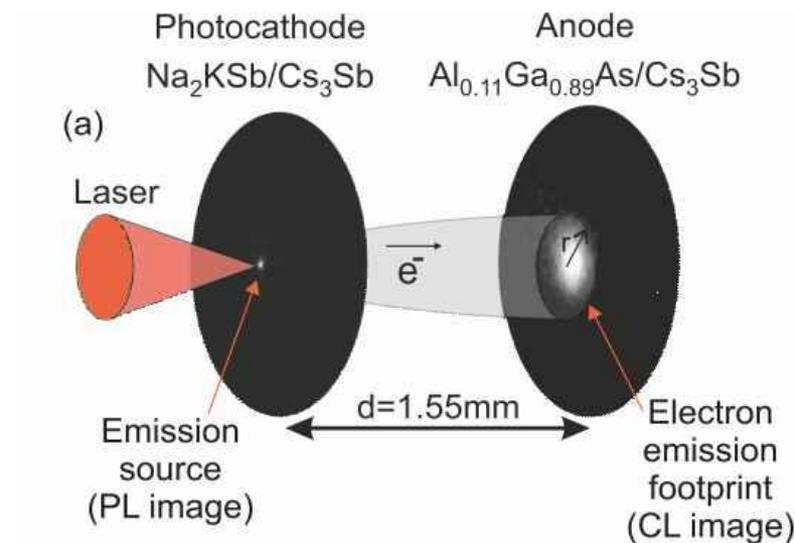
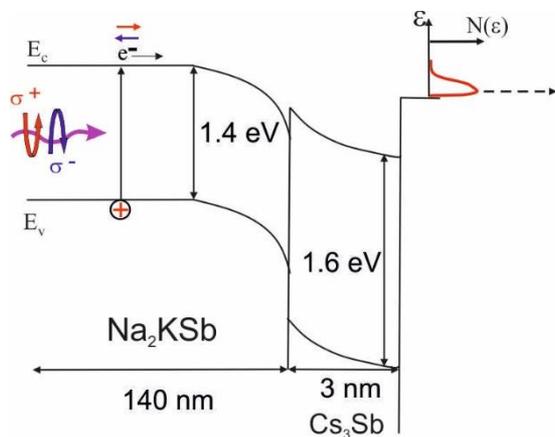
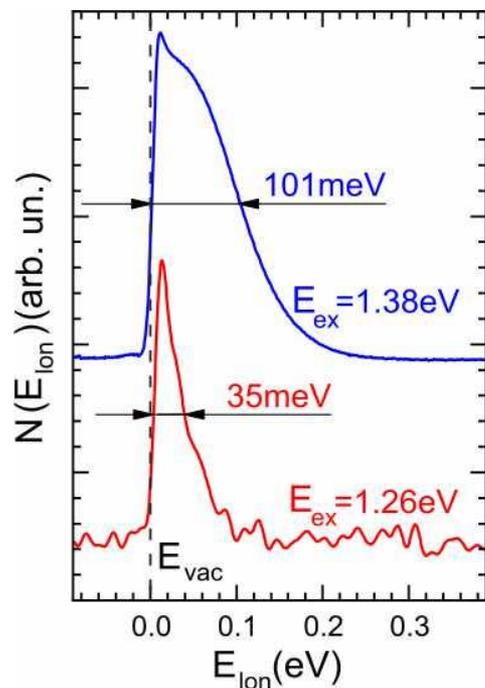
$E_p=1$  eV



$P_0(\text{GaAs})=20-25\%$   $\longrightarrow$

$P_0(\text{Na}_2\text{KSb})=40-50\%$

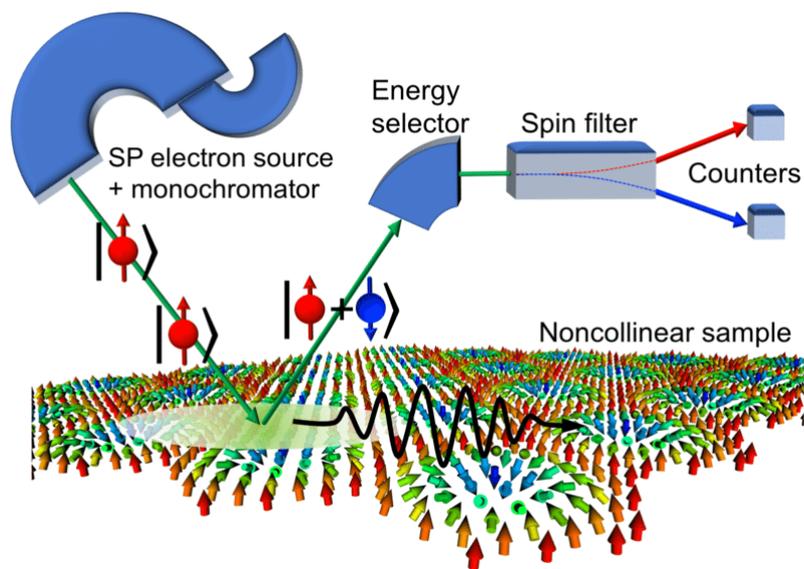
# Распределение фотоэмитированных электронов по энергии и углам



# Применение источников спин-поляризованных электронов в научно-приборном хозяйстве

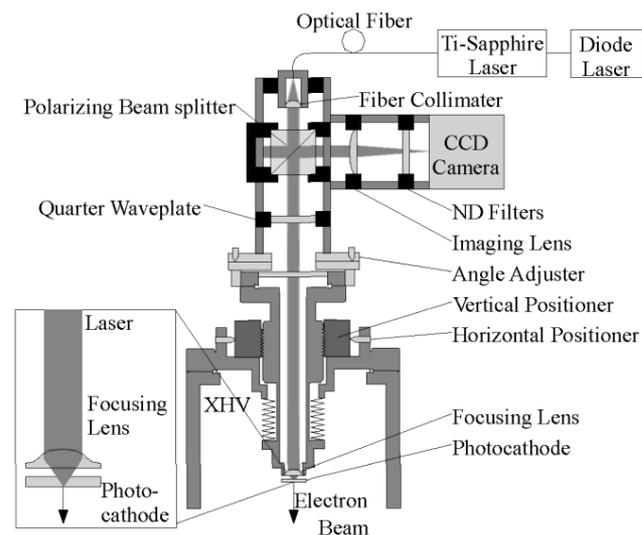
Спин-поляризованная спектроскопия  
характеристических потерь энергии  
электронов высокого разрешения

SPIN-POLARIZED ELECTRON ENERGY LOSS  
SPECTROSCOPY (SPEELS)



Спин-поляризованный  
электронный микроскоп

SPIN-POLARIZED LOW-ENERGY ELECTRON  
MICROSCOPY (SPLEEM)

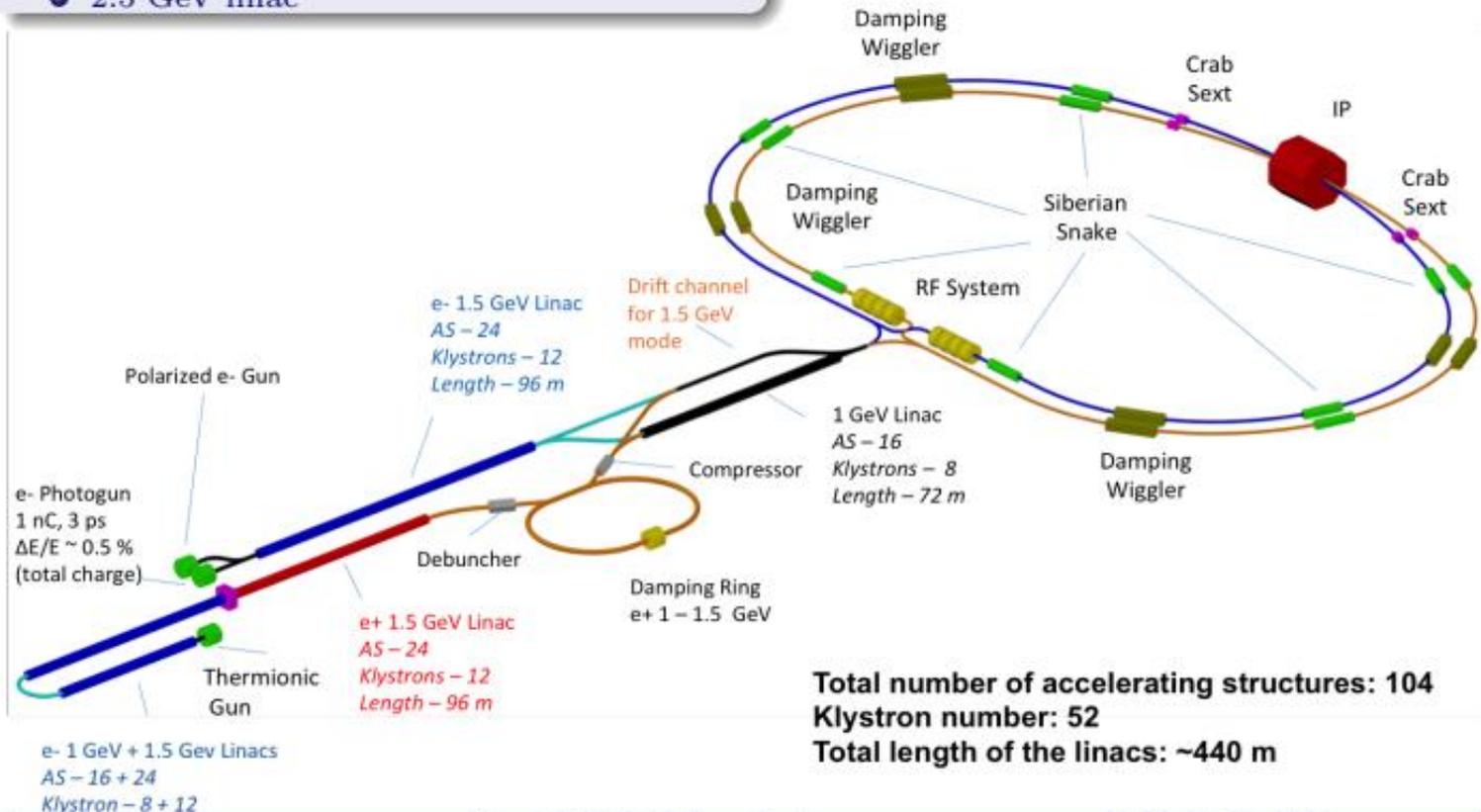


# Источник спин-поляризованных электронов (позитронов) для Супер Чарм-Тау фабрики (Новосибирск, Саров)

## Collider project LAYOUT

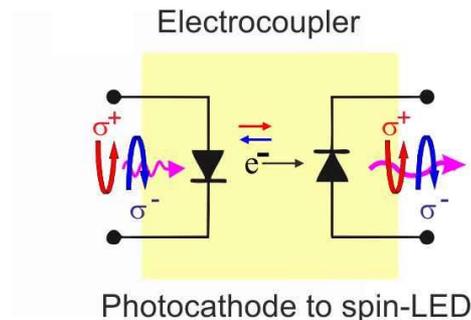
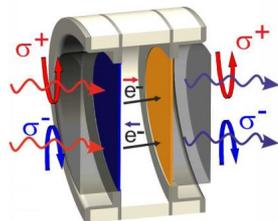
### Main solutions

- Double ring collider
- Crab waist collisions
- 5 Siberian Snakes  $\rightarrow \sim 80\%$  Pol.Lev.
- 2.5 GeV linac



# Заключение

- Продемонстрирована возможность измерения поляризации электронного пучка по спину в поперечном сечении с помощью полупроводниковой гетероструктуры
- $\text{Na}_2\text{KSb}$  фотокатод является эффективным источником спин-поляризованных пучков электронов
- Спиновый вакуумный фотодиод интересен с точки зрения реализации элементов вакуумной спинтроники



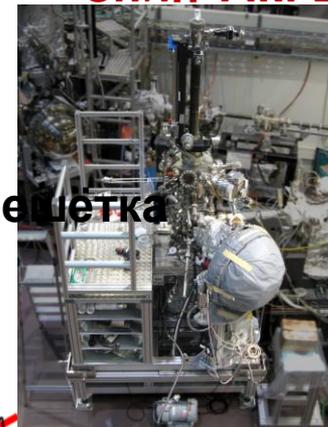
# Станция 1-6 "Электронная структура"



СПИН-ARPES

## Параметры:

- 10 – 1900 эВ
- ЭМ ондулятор
- Дифракционная решетка



## Задачи:

### 1. NAP XPS

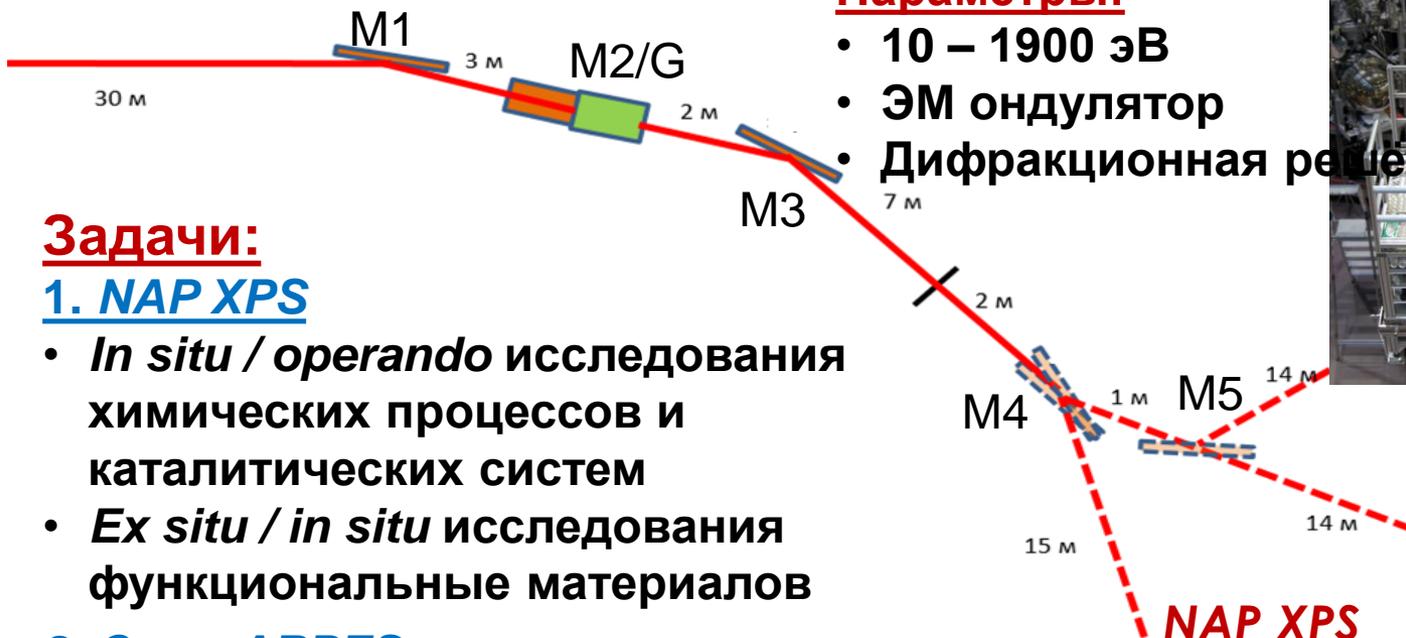
- *In situ / operando* исследования химических процессов и каталитических систем
- *Ex situ / in situ* исследования функциональные материалов

### 2. Спин-ARPES

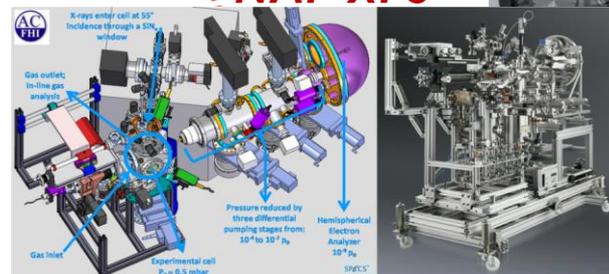
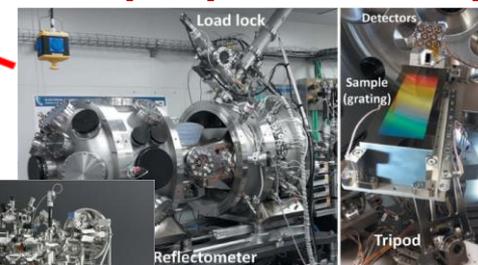
- Электронная и спиновая структура материалов для электроники и спинтроники

### 3. Рефлектометрия и метрология

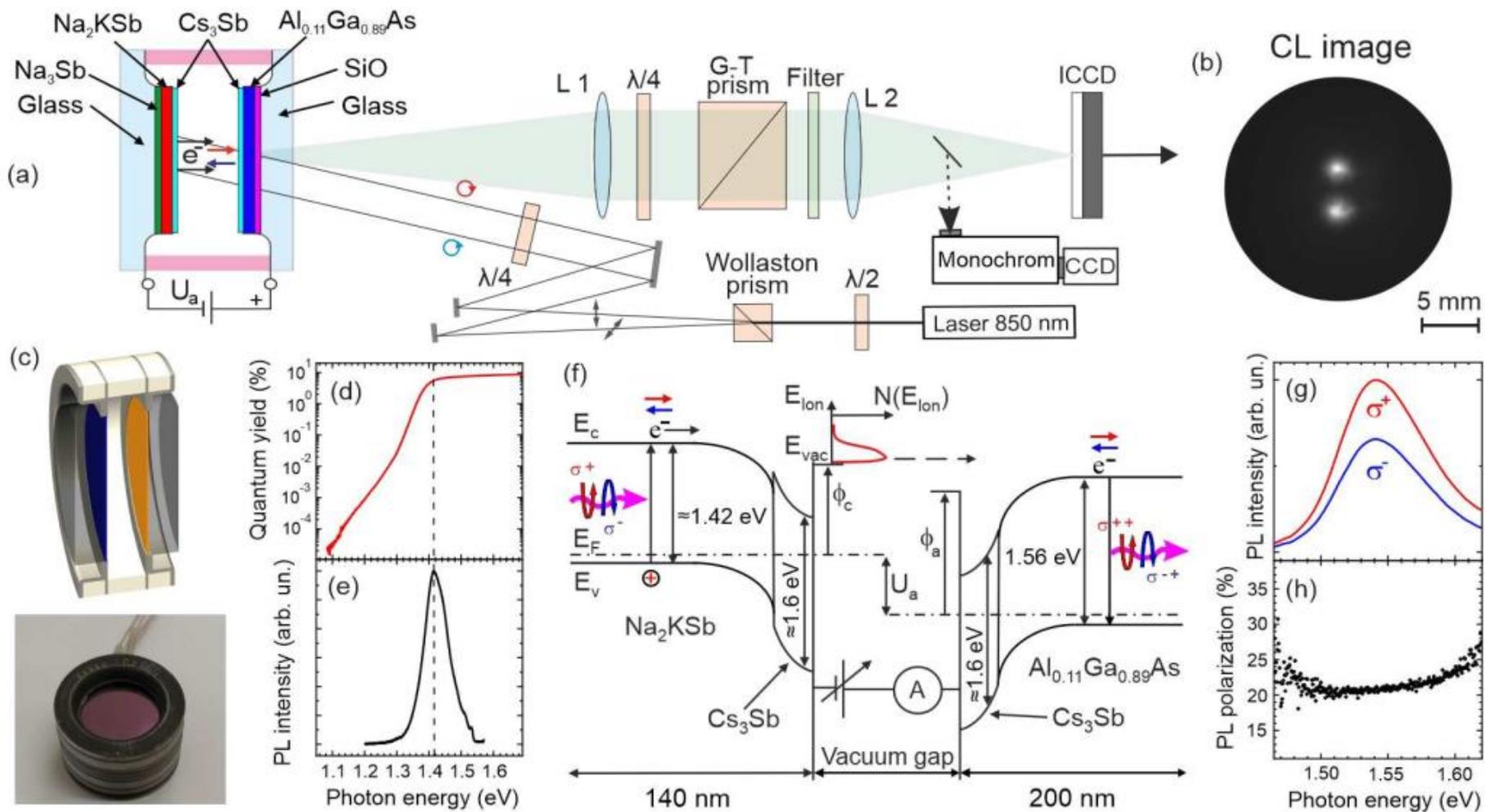
- Сертификация рентгеновской оптики
- Калибровка рентгеновских детекторов



рефлектометр

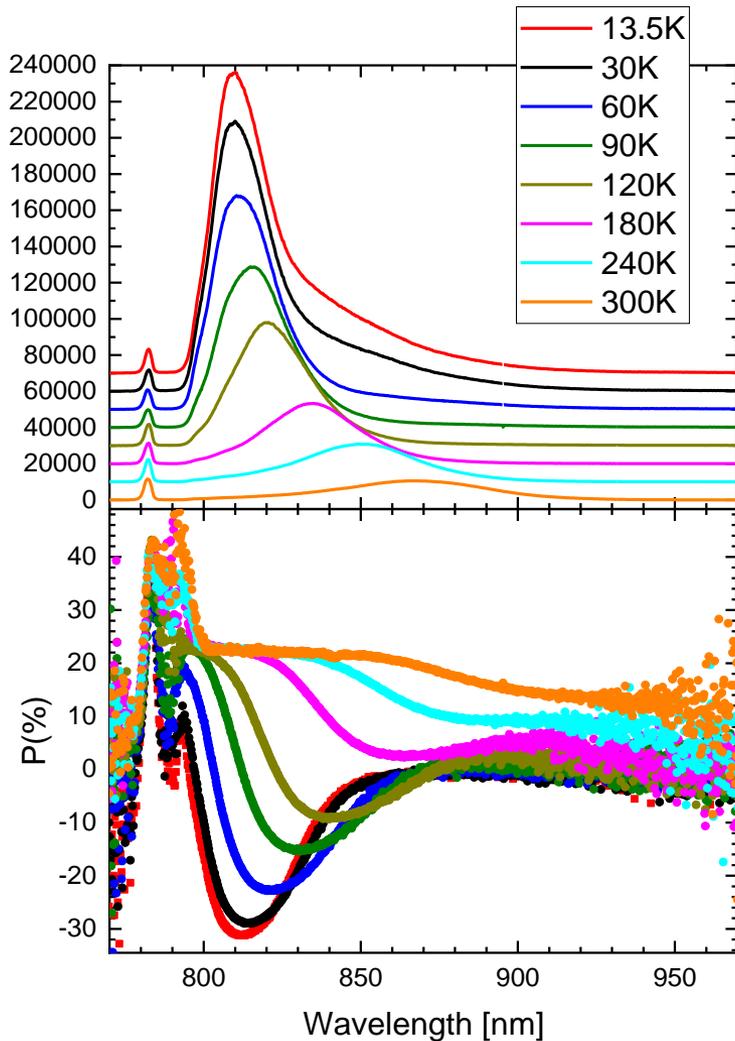


# Эксперимент: измерение спин-поляризованной фотоэмиссии из $\text{Na}_2\text{KSb}$ фотокатода

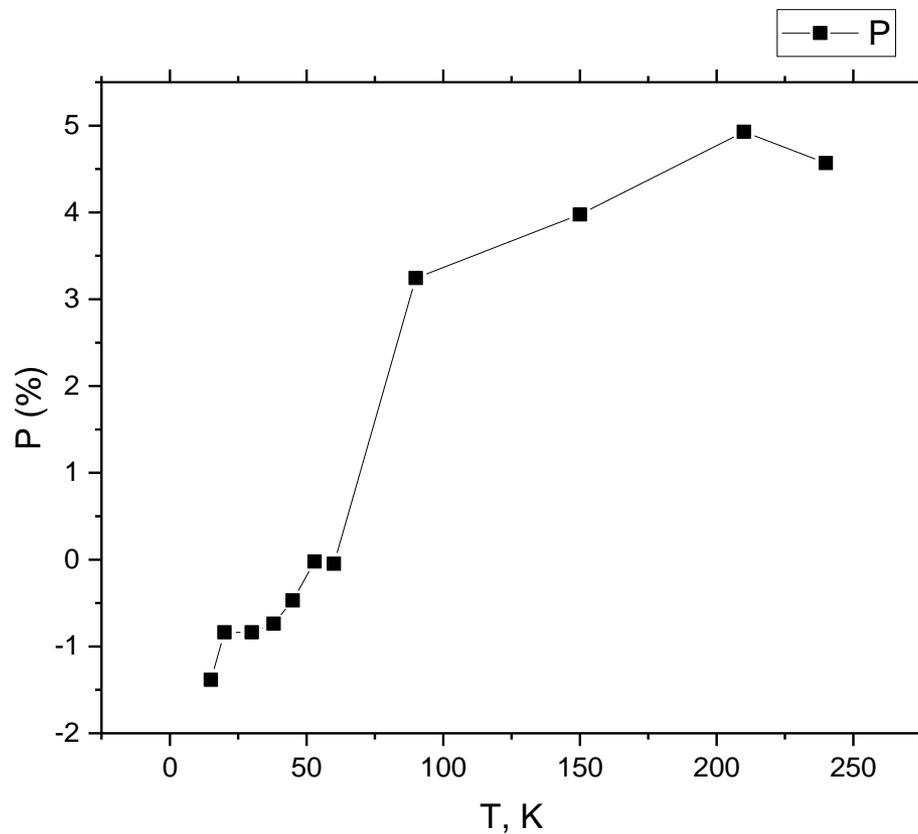


# Возможна ли поляризация в $\text{Na}_2\text{KSb}$ свыше 50 % ?

Температурная зависимость интенсивности и степени поляризации ФЛ в  $\text{Na}_2\text{KSb}:\text{Cs}$

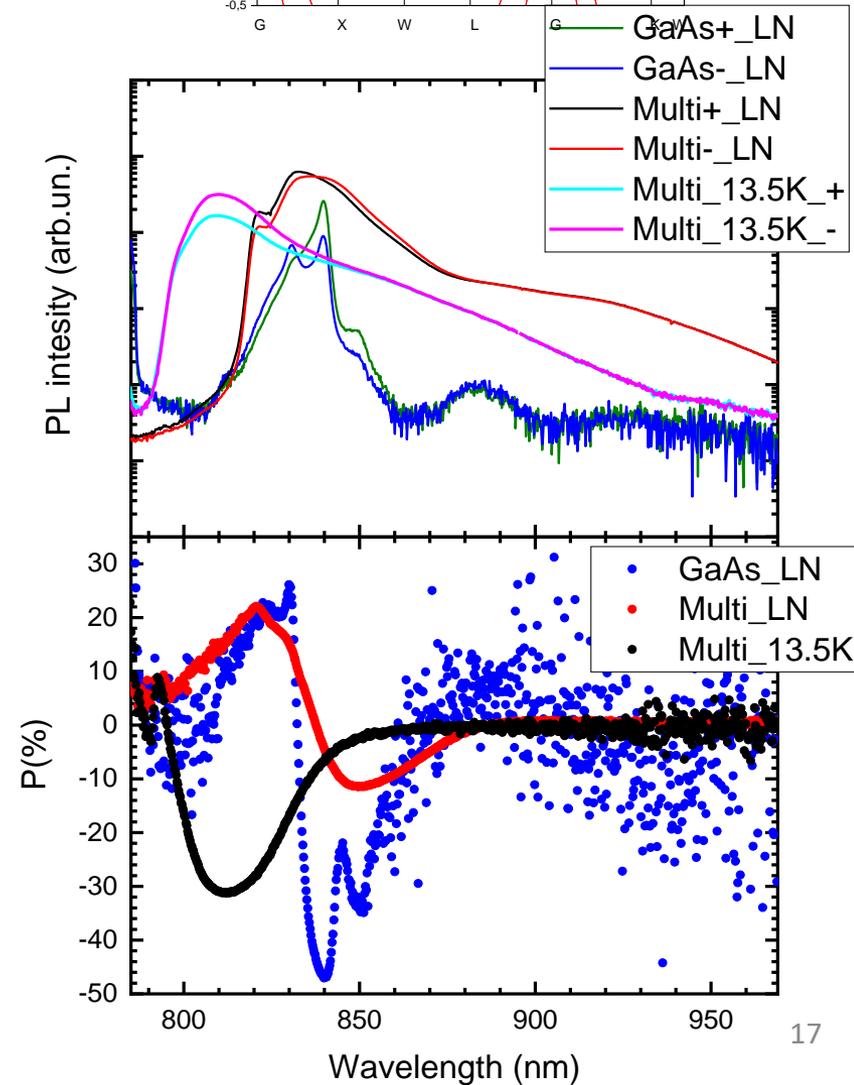
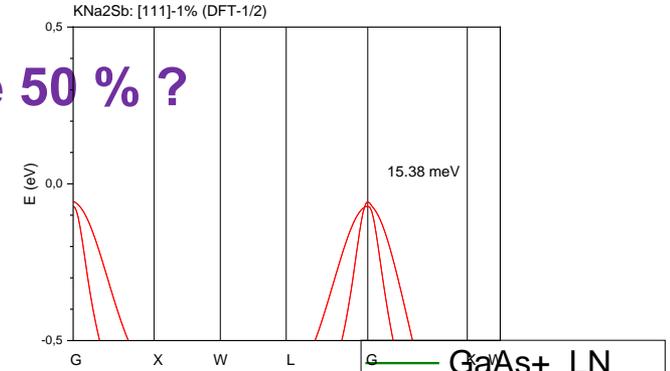
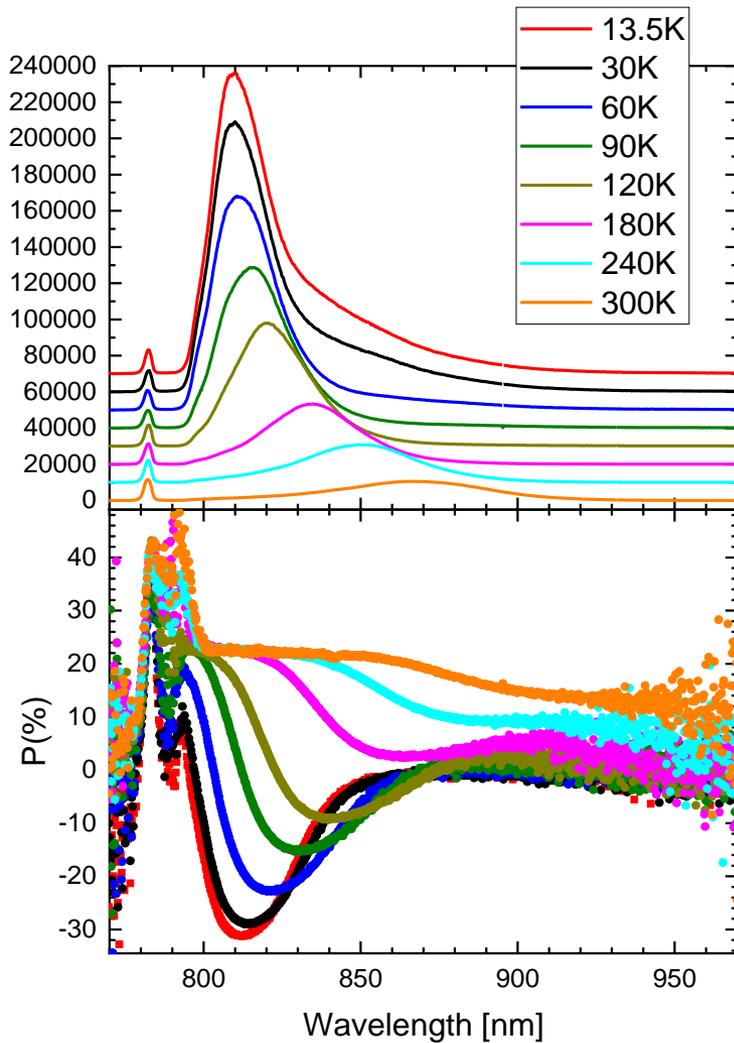


Температурная зависимость степени поляризации КЛ при фотоэмиссии из  $\text{Na}_2\text{KSb}:\text{Cs}$  катода

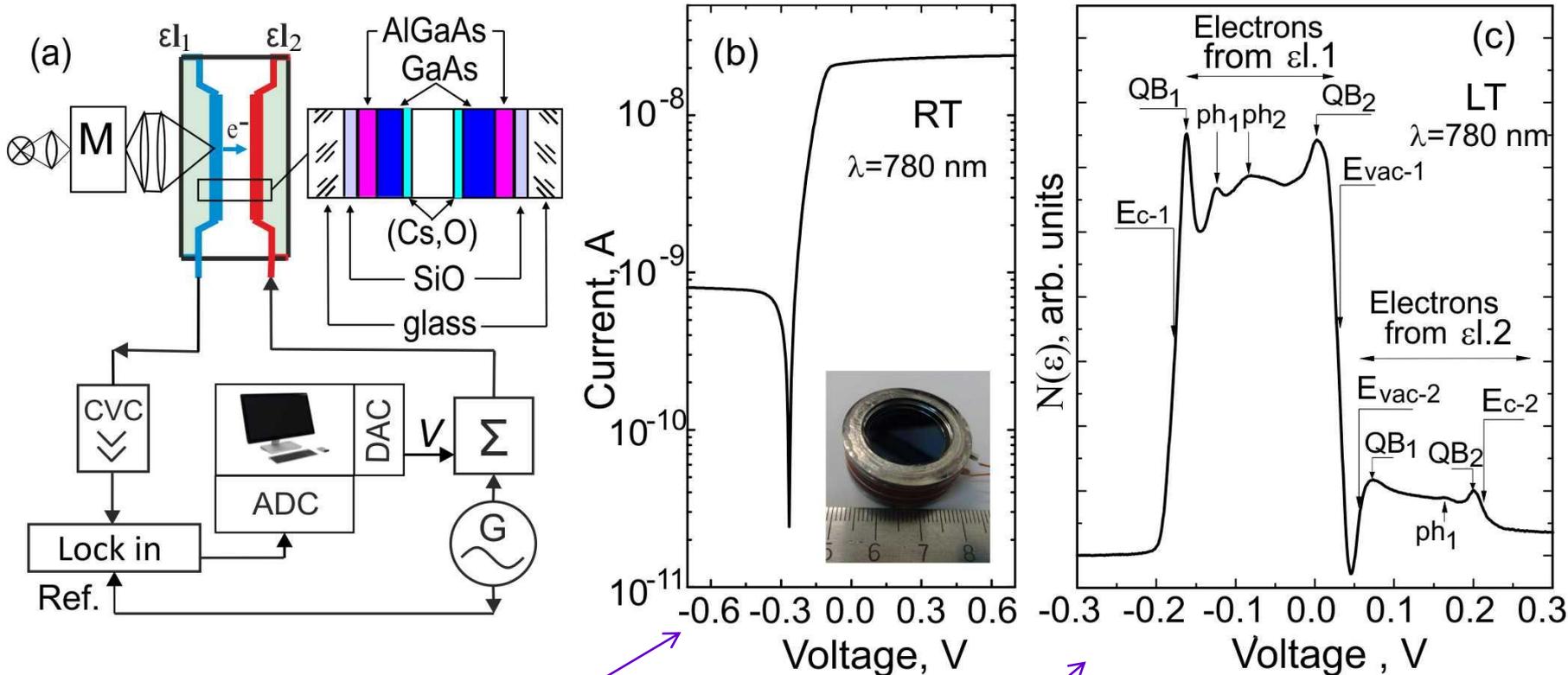


# Возможна ли поляризация в $\text{Na}_2\text{KSb}$ свыше 50 % ?

Температурная зависимость  
интенсивности и степени поляризации  
ФЛ в  $\text{Na}_2\text{KSb}:\text{Cs}$



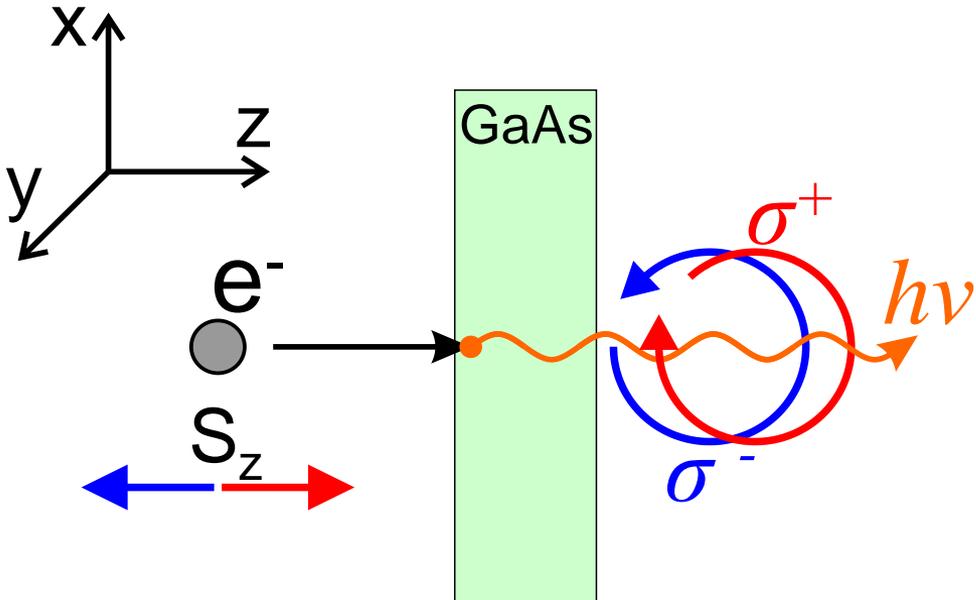
# Measurement of Energy Distribution Curves of emitted electrons



$$J(V) = \int_0^{\infty} eN_{\epsilon_{l1}}(E)T_{\epsilon_{l2}}(E^*)dE - \int_0^{\infty} eN_{\epsilon_{l2}}(E)T_{\epsilon_{l1}}(E^*)dE$$

$$\frac{dJ}{dV} = \int_0^{\infty} eN_{\epsilon_{l1}} \frac{\partial T_{c2}(E^*)}{\partial V} dE - \int_0^{\infty} eN_{\epsilon_{l2}} \frac{\partial T_{c1}(E^*)}{\partial V} dE = N_1(E_{\perp}) - N_2(E_{\perp})$$

# Measurement of out-of-plane spin polarization component



$$A = \frac{I\sigma^+ - I\sigma^-}{I\sigma^+ + I\sigma^-}$$

$$P_z = A/S$$

$$F = S^2 * I/I_0$$

**GaAs:**  
Photoluminescence polarization:

$$P = \frac{P_0}{1 + \tau/\tau_s} \sim 0,5 P_0 \rightarrow \boxed{S = 0.5}$$

PL yield  $\sim 2\% \rightarrow I/I_0 = 0.02$  (x10)

$$F_1 = S^2 * I/I_0 = 0.5^2 * 0.02 \sim 5 \cdot 10^{-3}$$

$$F_m = N * F_1 = 10^6 * 5 \cdot 10^{-3} \sim 5000$$

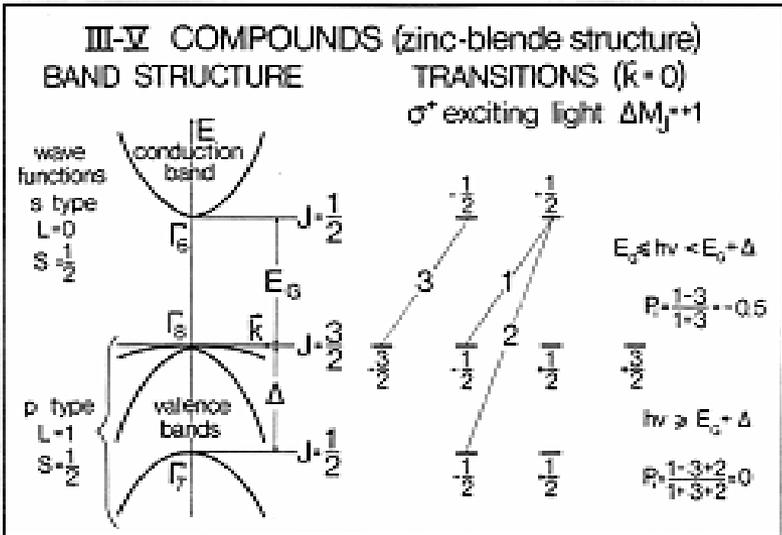
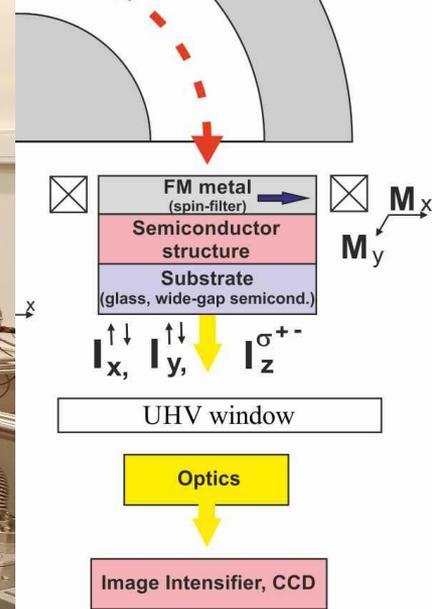
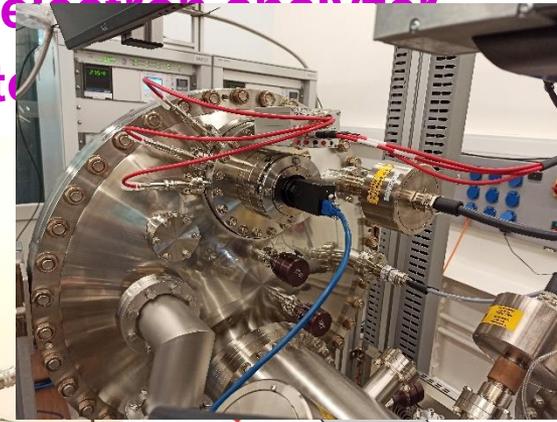


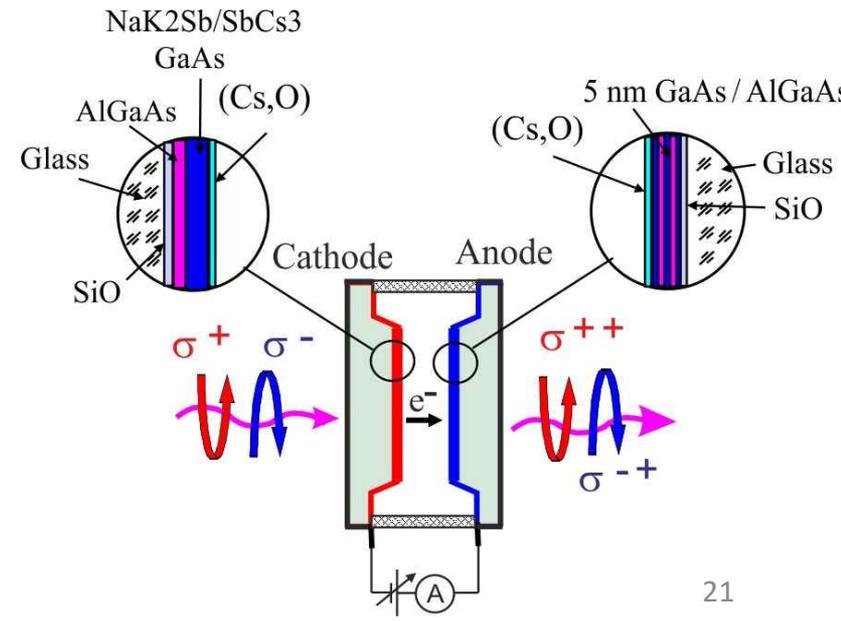
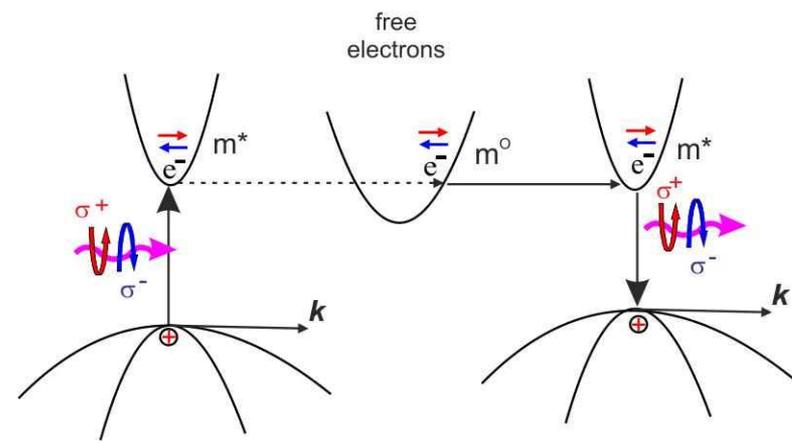
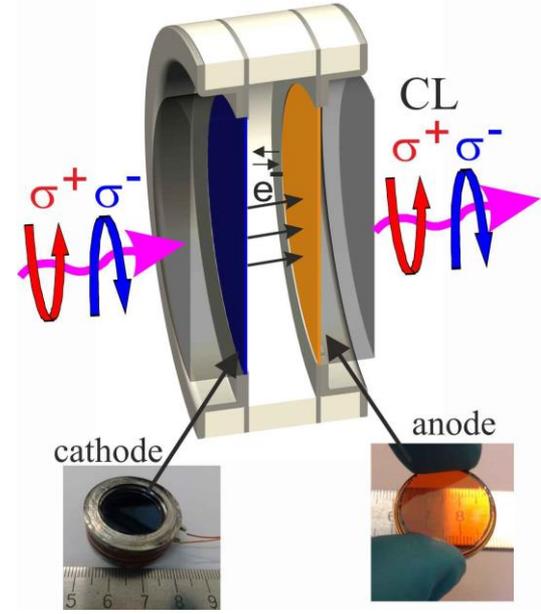
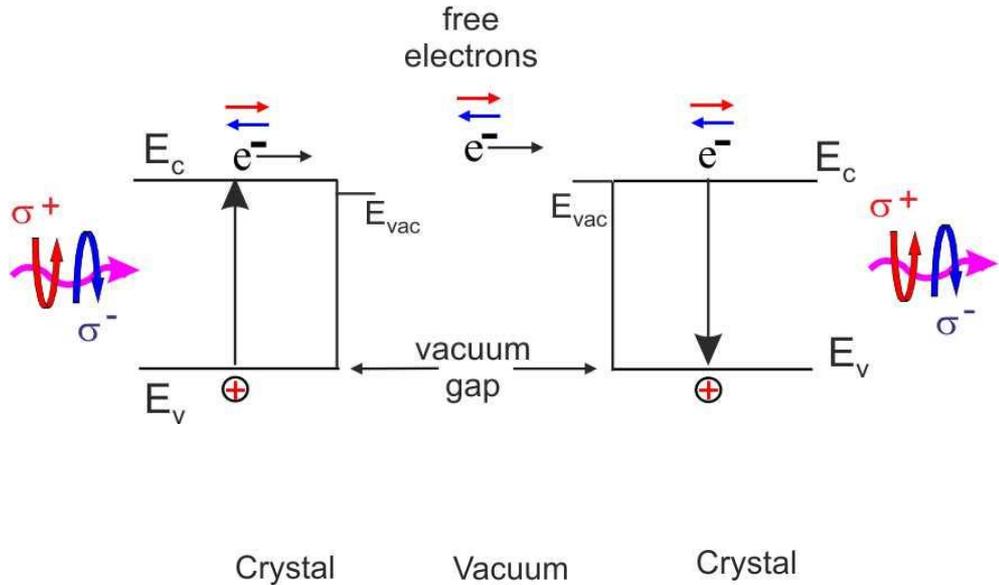
Image Intensifiers: 50 lines per mm,  $\rightarrow 20 \times 20 \text{ mm} * 50 * 50 = 10^6$  pixels

Motivation:

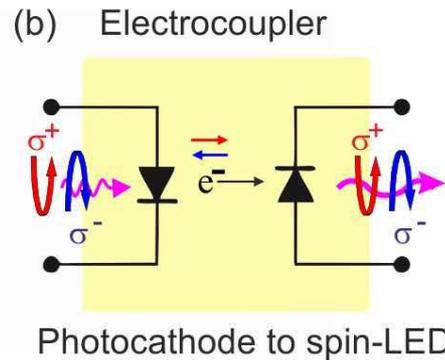
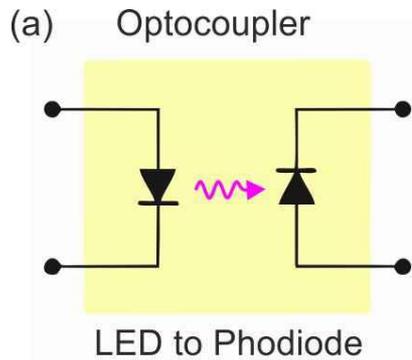
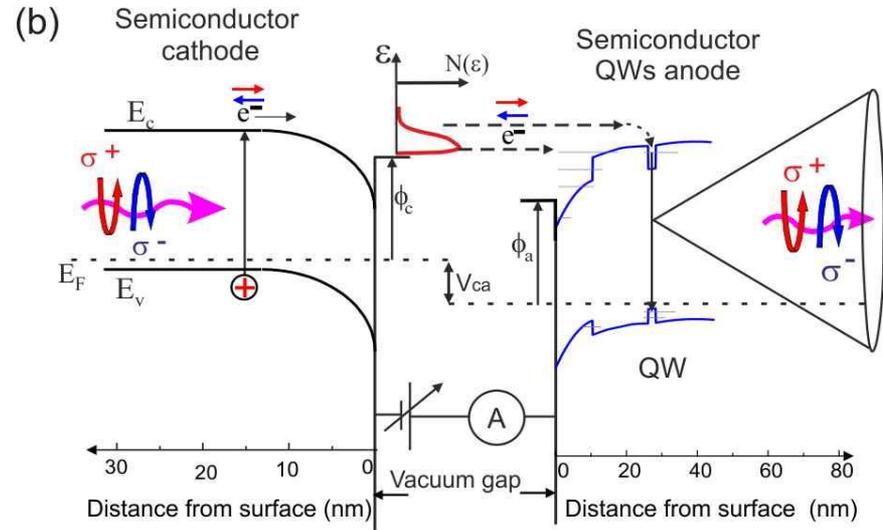
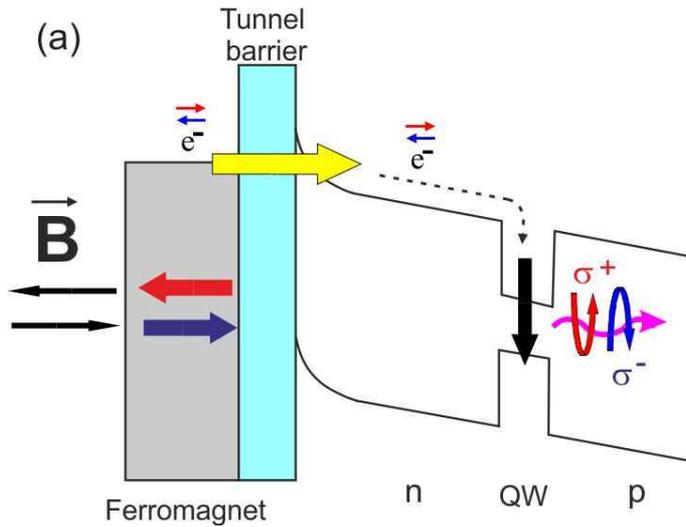
# Concept of projection-type 3D spin-resolving electron spectrometer based on Ferromagnetic - Semiconductor



# Устройство и принцип работы спинового вакуумного фотодиода

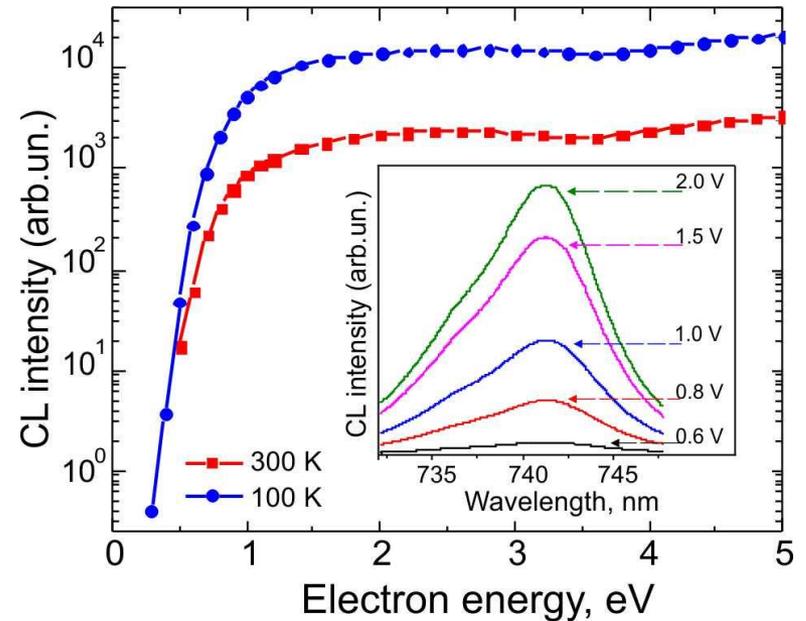
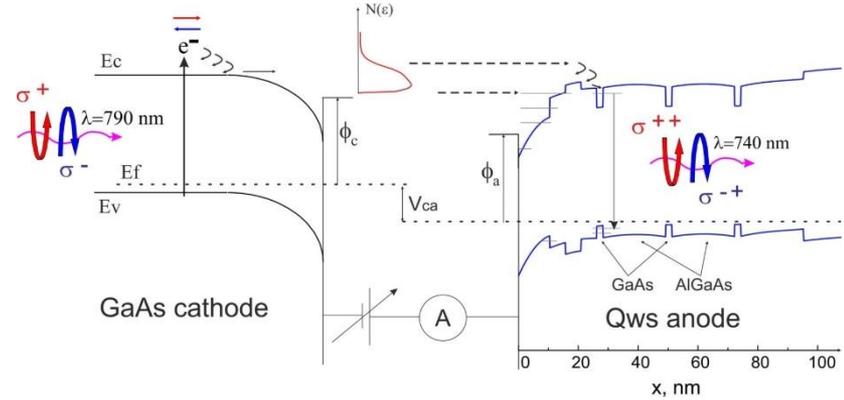
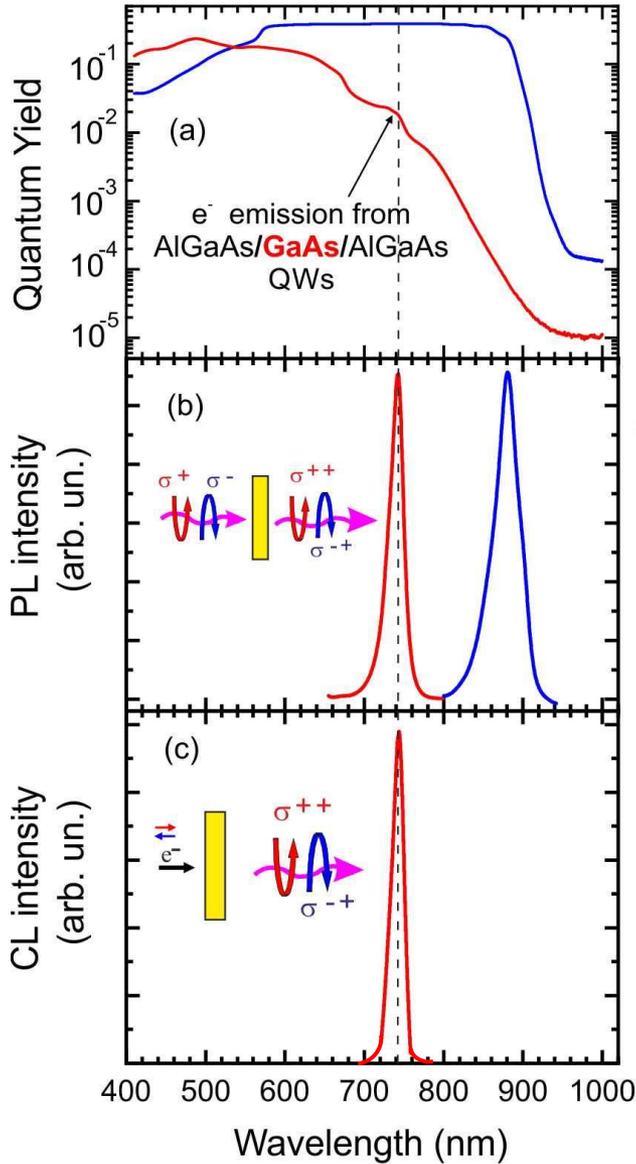


# Transformation of the monolithic spin-LED into vacuum spin-LED



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

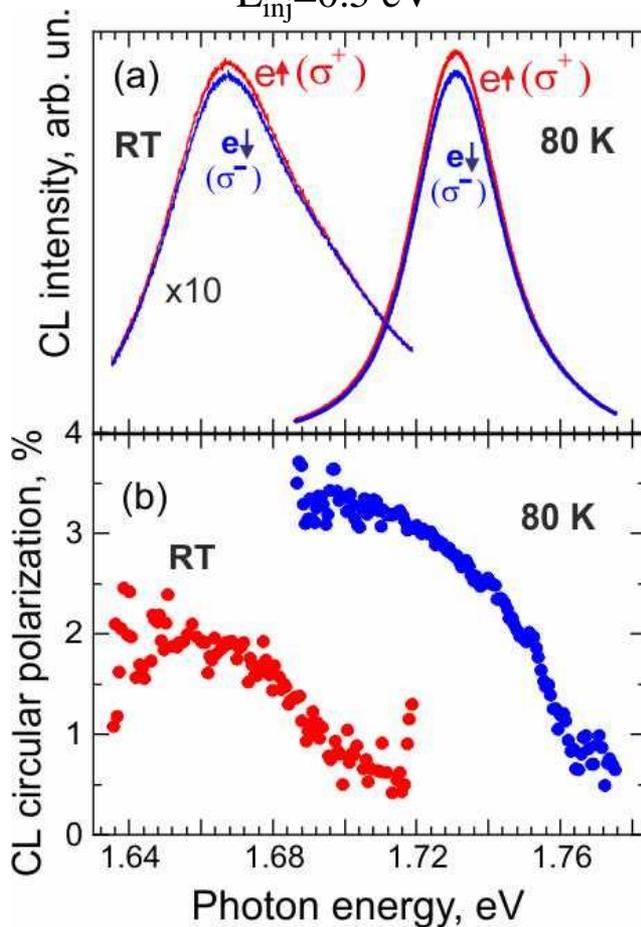
# Фотоэмиссионные и инжекционные свойства вакуумного фотодиода



# Спектральная поляризация катодо- и фотолюминесценции в КЯ.

Катодолюминесценция

$E_{inj}=0.5$  eV



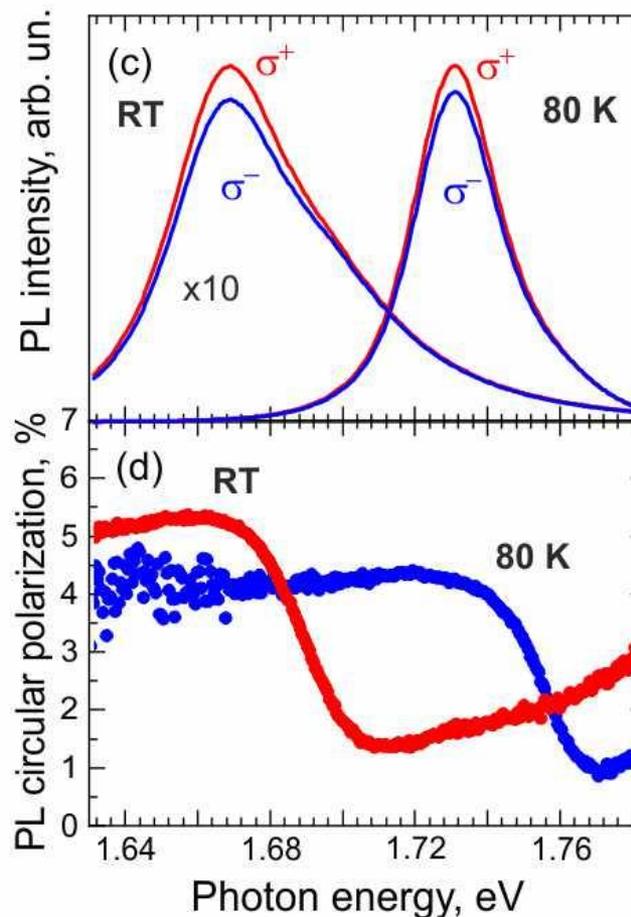
$$P_0=20 \%$$

$$A_{CL}=2 \%$$

$$S=A_{CL}/P_0=0.1$$

Фотолюминесценция

$\hbar\nu=1.91$  eV

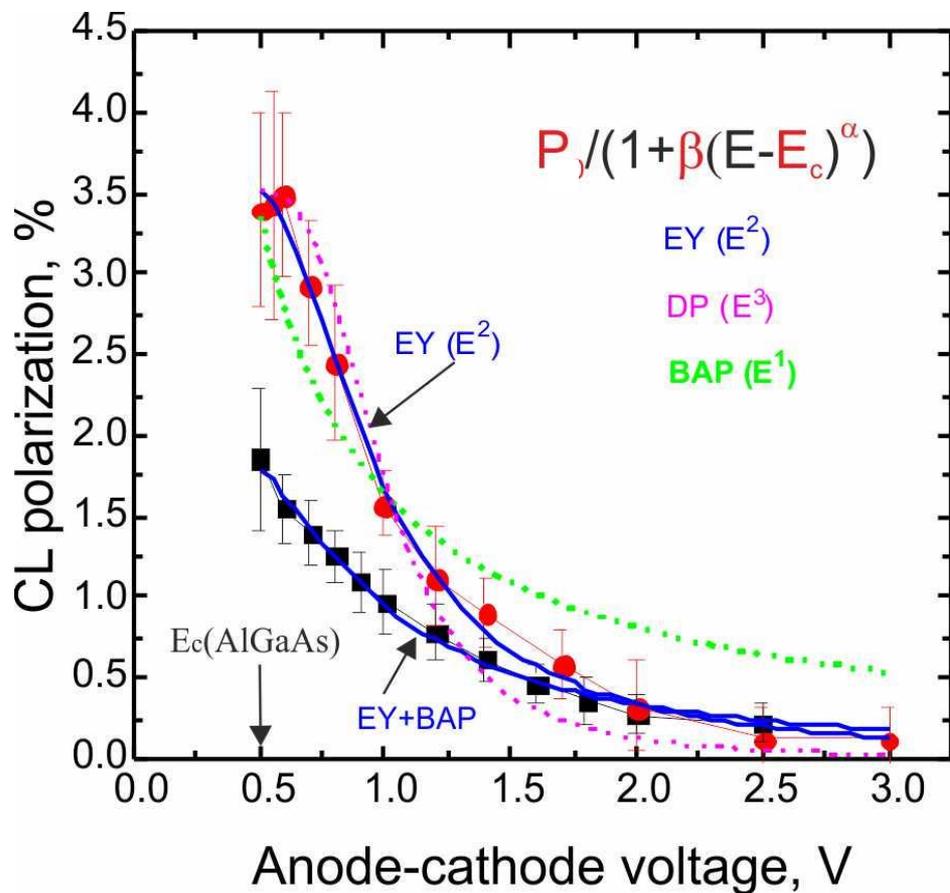


$$P_0=50 \%$$

$$A_{PL}=5 \%$$

$$S=A_{PL}/P_0=0.1$$

# Поляризация катодолуминесценции от энергии инжектируемых электронов



$$P_{CL} = P_0 * k_1 * k_2 * k_3 \quad P = \frac{P_0}{1 + \tau / \tau_s}$$

$$P_0 = 20\%$$

$$P_{CL} = P_0 / [(1 + \tau_{QWR} / \tau_{QWS}) (1 + \tau_r / \tau_s)]$$

$$\tau_s(E) \sim E^{-\alpha}$$

$\alpha = 3$  Dyakonov-Perel

$\alpha = 2$  Elliott Yafet

$\alpha = 1$  Bir- Aronov-Pikus

$$S = P_{CL}(E) / P_0 = 0.1 / (1 + 2.3(E - 0.48)^{1.5})$$

$A = S \approx 0.1$  (Sherman function)

$F = S^2 I / I_0$  – Figure of merit

$I / I_0 \sim 2\%$  (PL)

$$F = 10^{-2} 4 \times 10^{-2} = 4 \times 10^{-4}$$