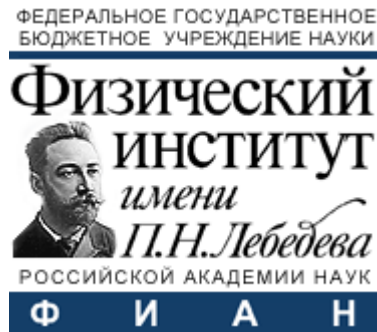




Транспортные свойства топологически нетривиальных систем

Моргун Леонид Александрович

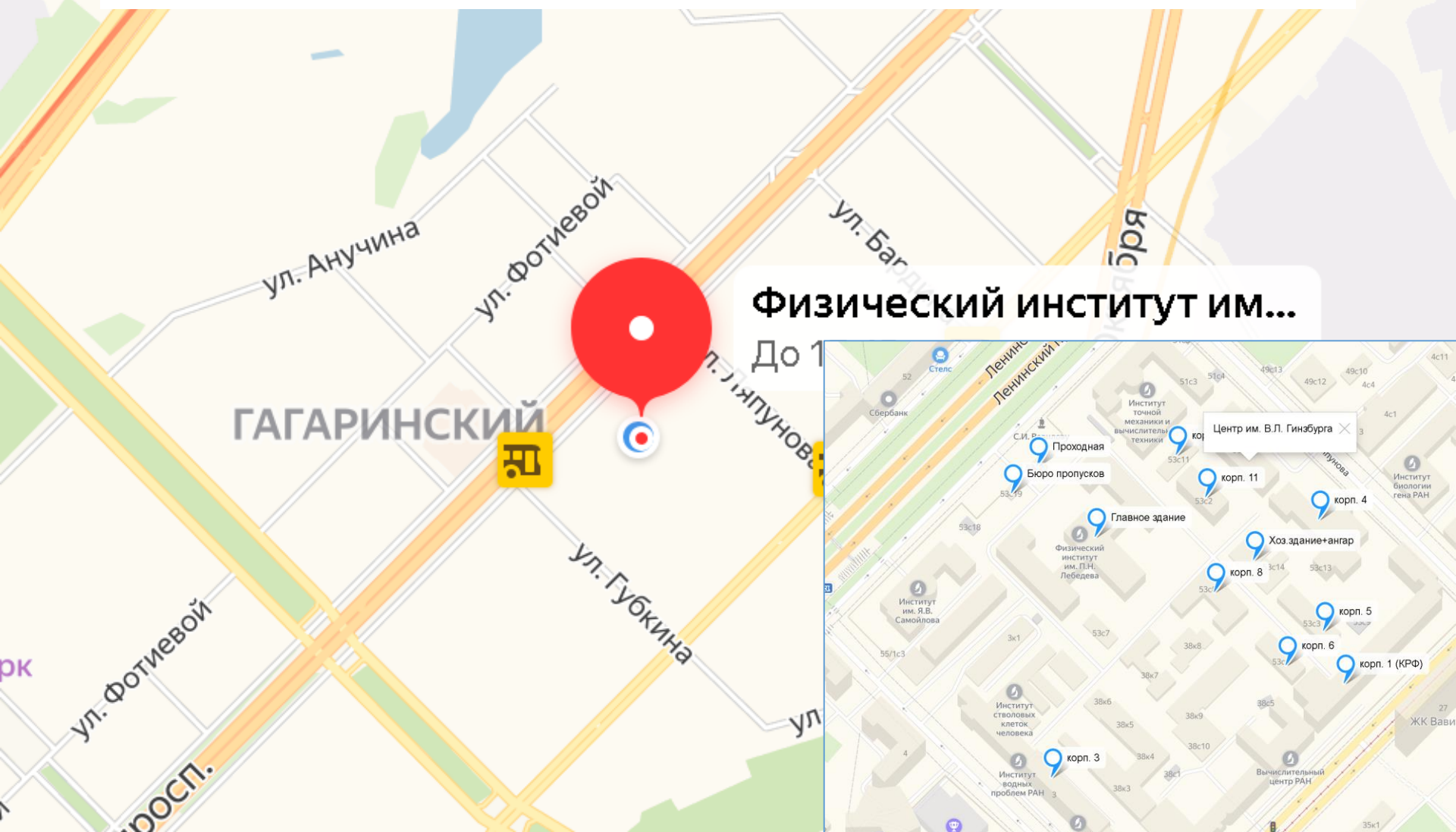
заместитель руководителя образовательной программы
«Физика сверхпроводимости и квантовых материалов»

morgunla@lebedev.ru

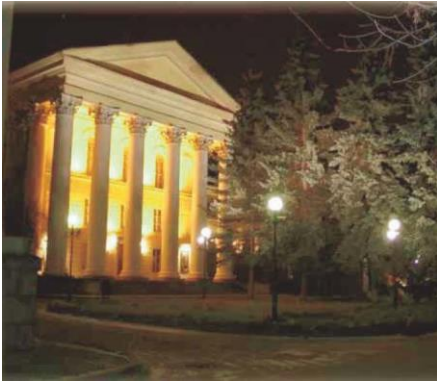
morgun.la@mipt.ru

+7(499) 132-69-07

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук



Корпус №10 ФИАН



Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга («Центр Гинзбурга»)

<https://sites.lebedev.ru/ovsisns>

Руководитель:

Пудалов Владимир Моисеевич, чл.-кор. РАН

+7 (499) 132-67-80

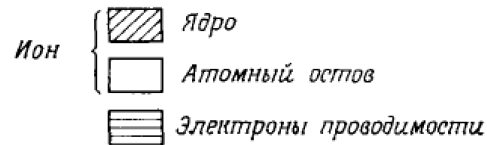
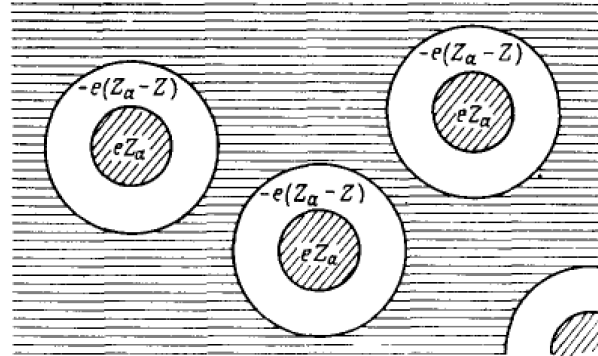
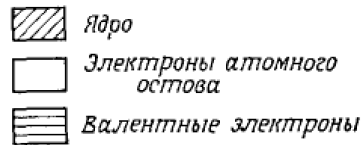
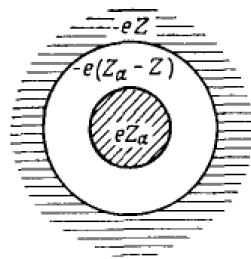
pudalovvm@lebedev.ru

<https://sites.lebedev.ru/pudalov/>

Что такое транспортные свойства в твёрдом теле?

- Перенос тепла – теплопроводность
- Перенос заряда – электрический ток
 - Зависимость транспортных свойств от концентрации носителей (электронов)
 - Зависимость от температуры
 - Зависимость от магнитного поля

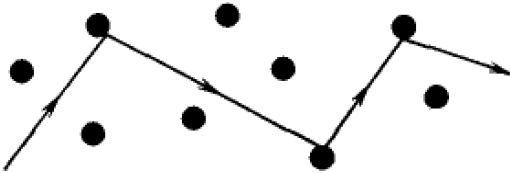
Теория металлов Друде



Задача. Оценить концентрацию (количество на единицу объёма) свободных электронов в металле и радиус сферы, объём которой равен объёму, приходящемуся на один электрон проводимости

Элемент	Z	$n, 10^{22} \text{ см}^{-3}$	$r_s, \text{ \AA}$	r_s/a_0
Li (78K)	1	4,70	1,72	3,25
Na (5K)	1	2,65	2,08	3,93
K (5K)	1	1,40	2,57	4,86
Rb (5K)	1	1,15	2,75	5,20
Cs (5K)	1	0,91	2,98	5,62
Cu	1	8,47	1,41	2,67
Ag	1	5,86	1,60	3,02
Au	1	5,90	1,59	3,01
Be	2	24,7	0,99	1,87
Mg	2	8,61	1,41	2,66
Ca	2	4,61	1,73	3,27
Sr	2	3,55	1,89	3,57
Ba	2	3,15	1,96	3,71
Nb	1	5,56	1,63	3,07
Fe	2	17,0	1,12	2,12
Mn (α)	2	16,5	1,13	2,14
Zn	2	13,2	1,22	2,30
Cd	2	9,27	1,37	2,59
Hg (78K)	2	8,65	1,40	2,65
Al	3	18,1	1,10	2,07

Статическая электропроводность металла (теория металлов Друде)



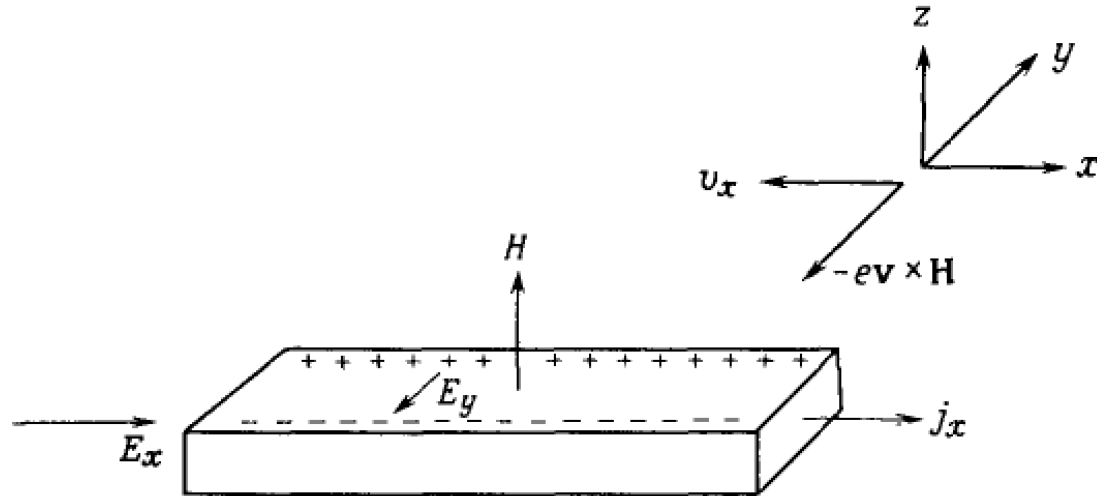
Траектория электрона проводимости, рассеивающегося на ионах, в соответствии с **наивными** представлениями Друде.

Задача. Оценить среднюю (дрейфовую) скорость электрона в металле под действием электрического поля E (формула Друде).

Времена релаксации (10^{-14} с), рассчитанные по теории Друде а)

Элемент	77 К	273 К	373 К
Li	7,3	0,88	0,61
Na	17	3,2	
K	18	4,1	
Rb	14	2,8	
Cs	8,6	2,1	
Cu	21	2,7	1,9
Ag	20	4,0	2,8
Au	12	3,0	2,1
Be		0,51	0,27
Mg	6,7	1,1	0,74
Ca		2,2	1,5
Sr	1,4	0,44	
Ba	0,66	0,19	
Nb	2,1	0,42	0,33
Fe	3,2	0,24	0,14
Zn	2,4	0,49	0,34
Cd	2,4	0,56	
Hg	0,71		
Al	6,5	0,80	0,55
Ga	0,84	0,17	
In	1,7	0,38	0,25
Tl	0,91	0,22	0,15
Sn	1,1	0,23	0,15
Pb	0,57	0,14	0,099
Bi	0,072	0,023	0,016
Sb	0,27	0,055	0,036

Эффект Холла (теория металлов Друде)

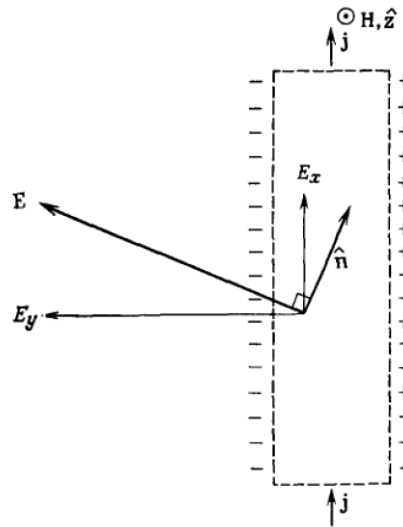


Задача. Вычислить поперечное напряжение, возникающее в проводнике с током в магнитном поле, перпендикулярном направлению тока (напряжение Холла)

Таблица 30.6. Значения коэффициента Холла для металлов

Металл, чистота	T, K	$B, Tл$	$R, 10^{-11} м^3/(A \cdot c)$	Литература
Алюминий 99,5%, $RRR = 11$	83	0,54	-2,2	[50]
То же	273	0,54	-3,3	[50]
»	573	0,54	-3,9	[50]
»	873	0,54	-4,1	[50]
Алюминий 99,9999%, $RRR = 84 \div 2600$	2—80	0,5	См. рис. 30.54	[51]
Бериллий монокристаллический 99,5%	290	0,3—2,0	$R_{B \parallel c_s} = -77$	[52]
Бериллий монокристаллический 99,99%	290	0,3—2,0	$R_{B \parallel c_s} = -76,4$	[53]
То же	290	0,3—2,0	$R_{B \perp c_s} = 148$	[53]
			См. рис. 30.55	[53]
Ванадий 99,6%, $RRR = 11,5$	20	—	6,2	[54]
То же	300	—	7,9	[54]
Висмут монокристаллический	—	—	См. рис. 30.56	[55]
Вольфрам 99,9%	870	0,54	15,6	[50]
То же	273	0,54	11,1	[50]
»	170	0,54	10,6	[50]
»	80	0,54	12,0	[50]
Гафний 99,9%, $RRR = 27,5$	300	1,3	4,2	[56]
То же	200	1,3	3,0	[56]
»	100	1,3	1,9	[56]
»	4,2	1,3	-2,6	[56]
Золото 99,9999%, $RRR = 1957$	300	1,52	-7,3	[57]
То же	4,2—300	—	См. рис. 30.57	[57]
Индий 99,9999%, $RRR = 7100$	300	—	-5,43	[58]
То же	6—280	$6,3(\omega\tau > 1)$	16	[59]
			См. рис. 30.58	[59]
Иридий $\rho(20 K)/\rho(300 K) = 0,91$	300			

Магнетосопротивление (модель Друде)



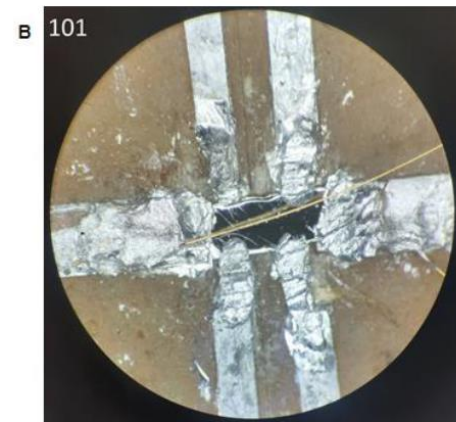
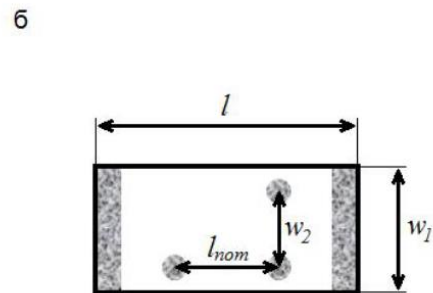
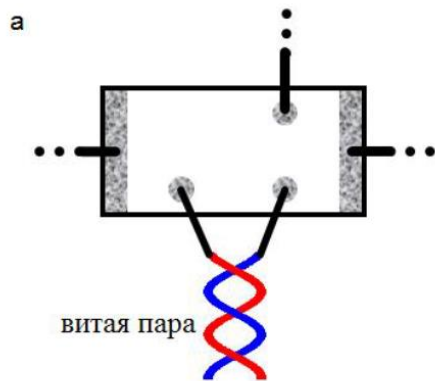
Задача. Оценить изменение продольного сопротивления из-за движения электрона в скрещенных магнитном и электрических полях.

Модель Друде

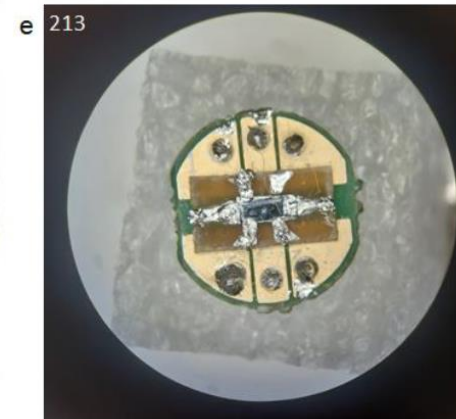
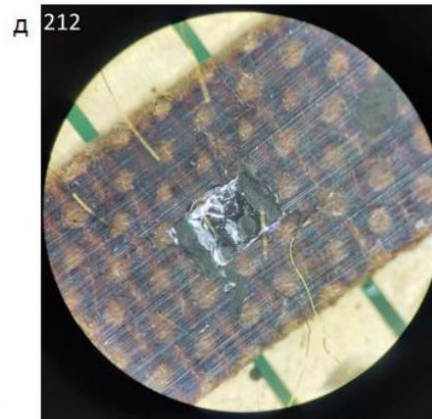
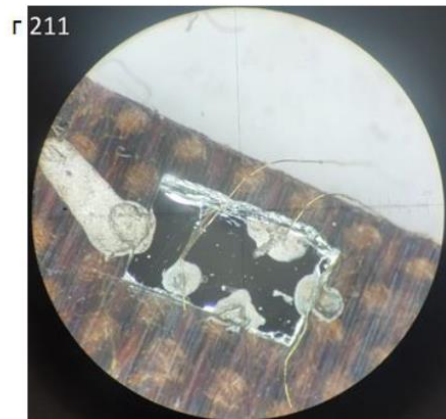
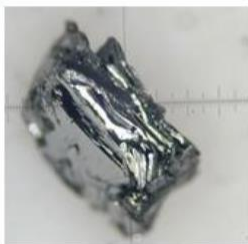
- Приближение свободных электронов. Роль ионов незначительна
- Приближение независимых электронов. Электроны не взаимодействуют друг с другом
- Приближение времени релаксации. Результат столкновения не зависит от состояния электронов в момент столкновения

Ошибочные следствия модели Друде

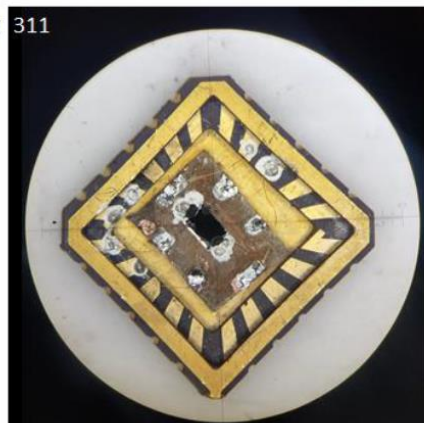
- Сопротивление не зависит от температуры без искусственного введения температурной зависимости времени релаксации
- Продольное магнетосопротивление имеет квадратичную зависимость от магнитного поля
- Коэффициент Холла не зависит от магнитного поля и температуры



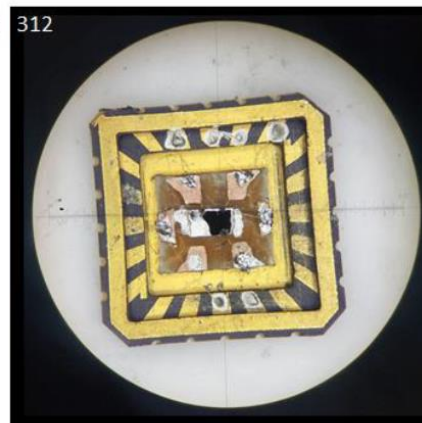
а



ж 311



з 312

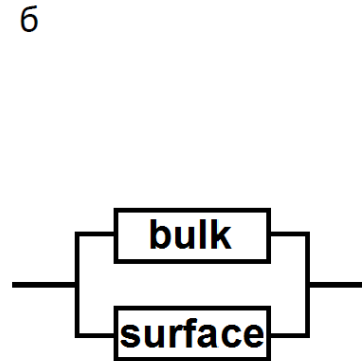
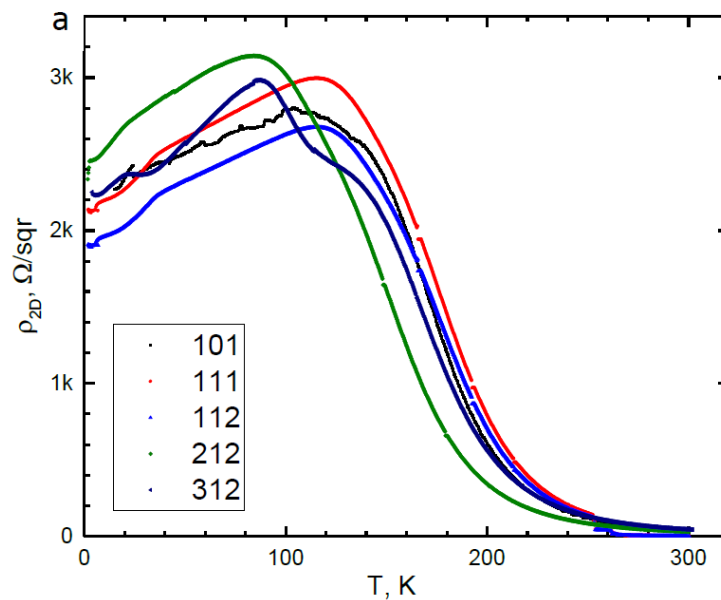


На фотографиях показаны некоторые установки для транспортных измерений:

- 21 Т
- BlueFors LD250
- CFMS-16



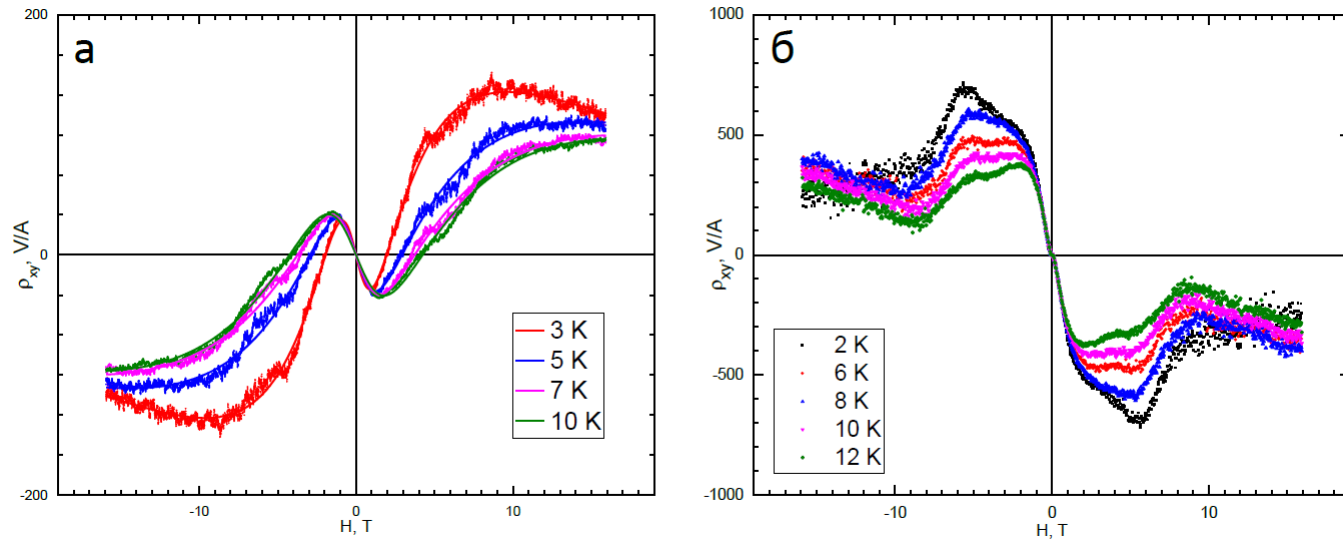
Температурная зависимость продольного сопротивления Sn-BSTS



$$\rho_{xx} = \left[\frac{(\rho_{surf} + \alpha T)^{-1}}{h} + \sigma_{bulk} \exp\left(\frac{\Delta}{2k_B T}\right) \right]^{-1}$$

образец	$\rho_{surf}, \Omega/\text{sqr}$	$\alpha, \Omega/K$	$\Delta, \text{мэВ}$	
101	2298,5	4,15	284	301
111	~2200	-	257	278
112	~2200	-	265	289
212	2306,6	5,5	182	250
311	2316	4.7	214	268

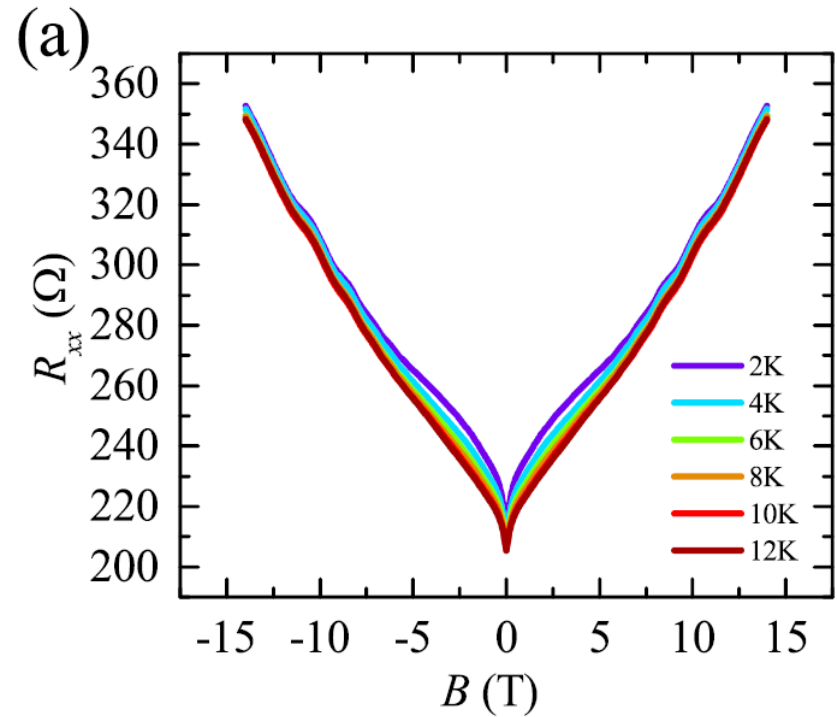
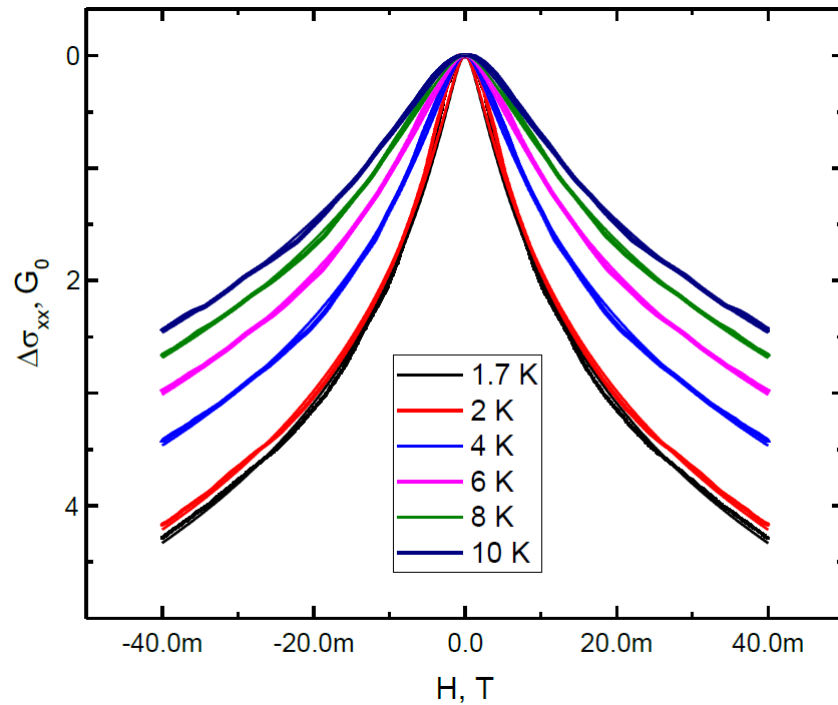
Температурная зависимость поперечного магнетосопротивления (коэффициент Холла) Sn-BSTS



$$\rho_{xy} = \frac{\rho_{xx}^2 \sigma_1 \mu_1 B}{1 + (\mu_1 B)^2} + \frac{\rho_{xx}^2 \sigma_2 \mu_2 B}{1 + (\mu_2 B)^2}$$

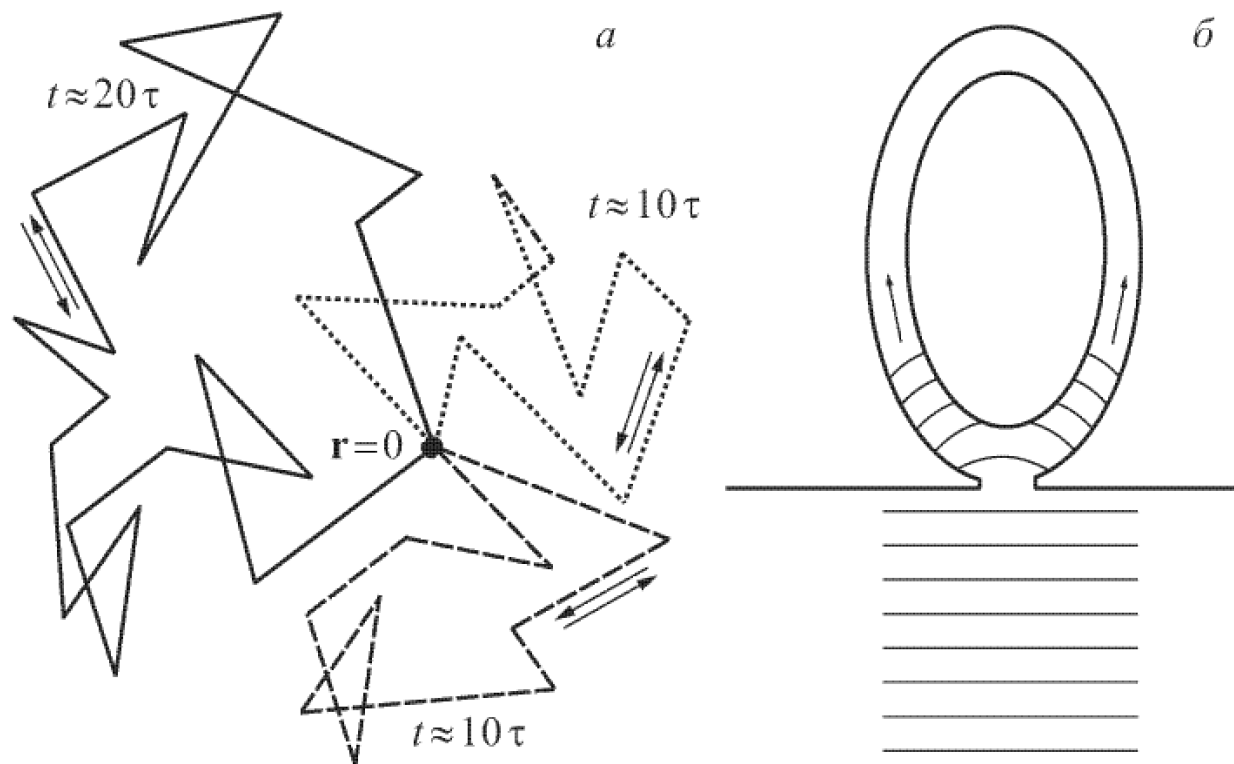
температура, К	σ_1 , А/В	μ_1 , м ² /В·с	σ_2 , А/В	μ_2 , м ² /В·с	n_{2D} , см ⁻²	n_{3D} , см ⁻³
3	3E-5	-0,643	6,6E-5	0,119	2,92E+10	4,62E+13
5	2.5E-5	-0,516	5,3E-5	0,078	7,99E+10	5,66E+13
7	2,5E-5	-0,432	4,8E-5	0,067	3,62E+10	5,97E+13
10	3E-5	-0,342	5,1E-5	0,071	5,48E+10	5,99E+13

Температурная зависимость продольного магнетосопротивления Sn- BSTS

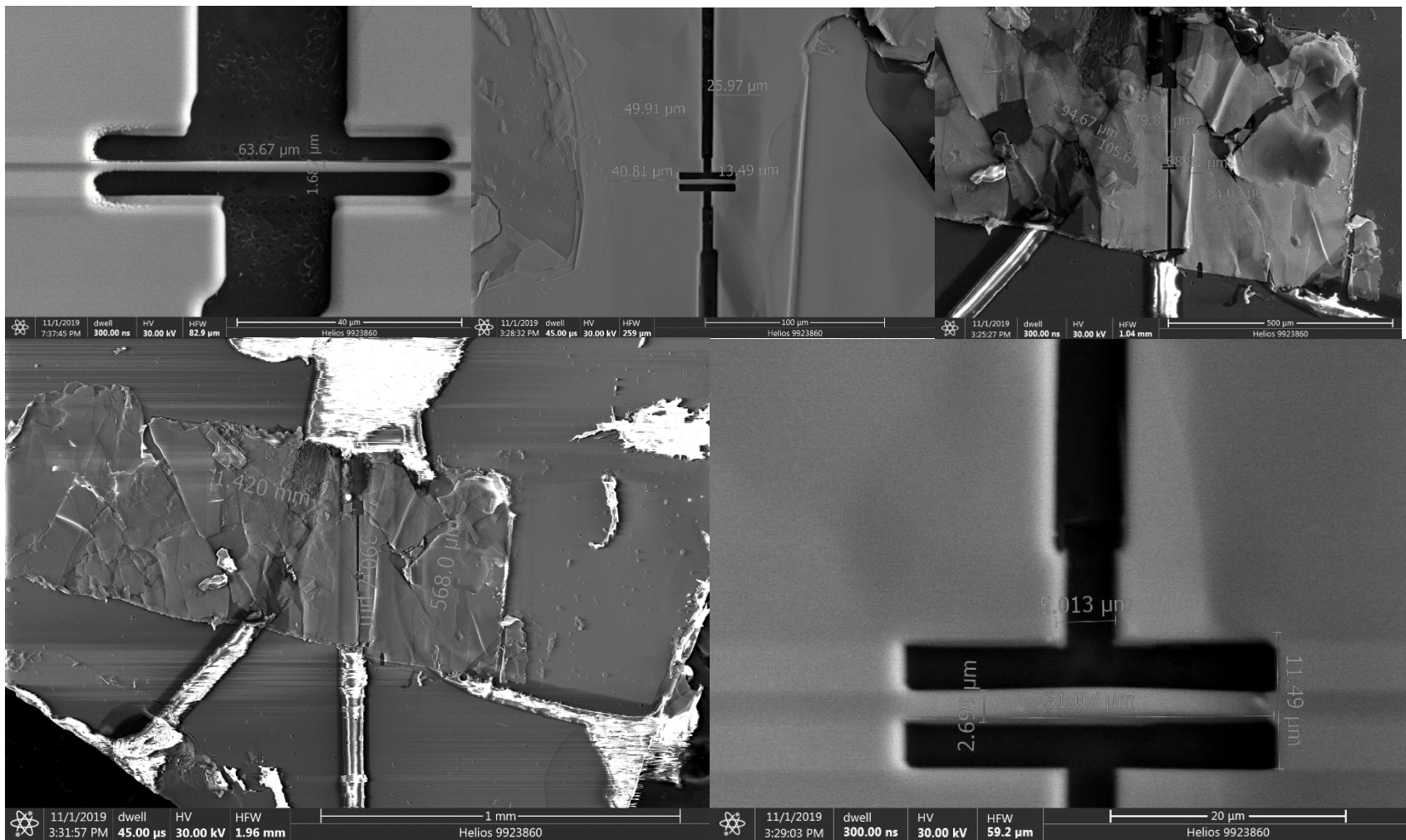


$$\sigma(B) - \sigma(B = 0) = \Delta\sigma(B) = G_0 \alpha \left[\Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{B_\varphi}{B}\right) - \ln\left(\frac{B_\varphi}{B}\right) \right]; \quad B_\varphi = \frac{\hbar}{4eL_\varphi^2}$$

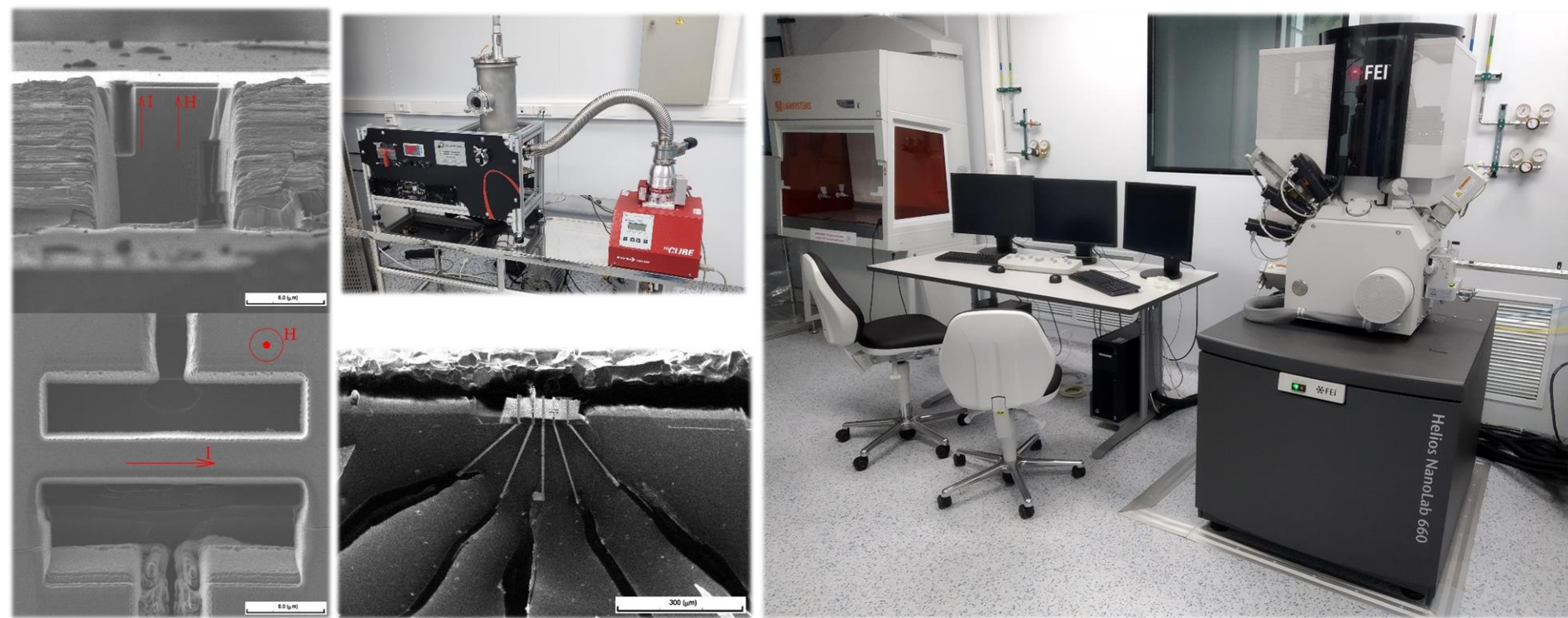
Слабая локализация (антилокализация)



Задача. Оценить поправку к проводимости из-за слабой локализации электронов



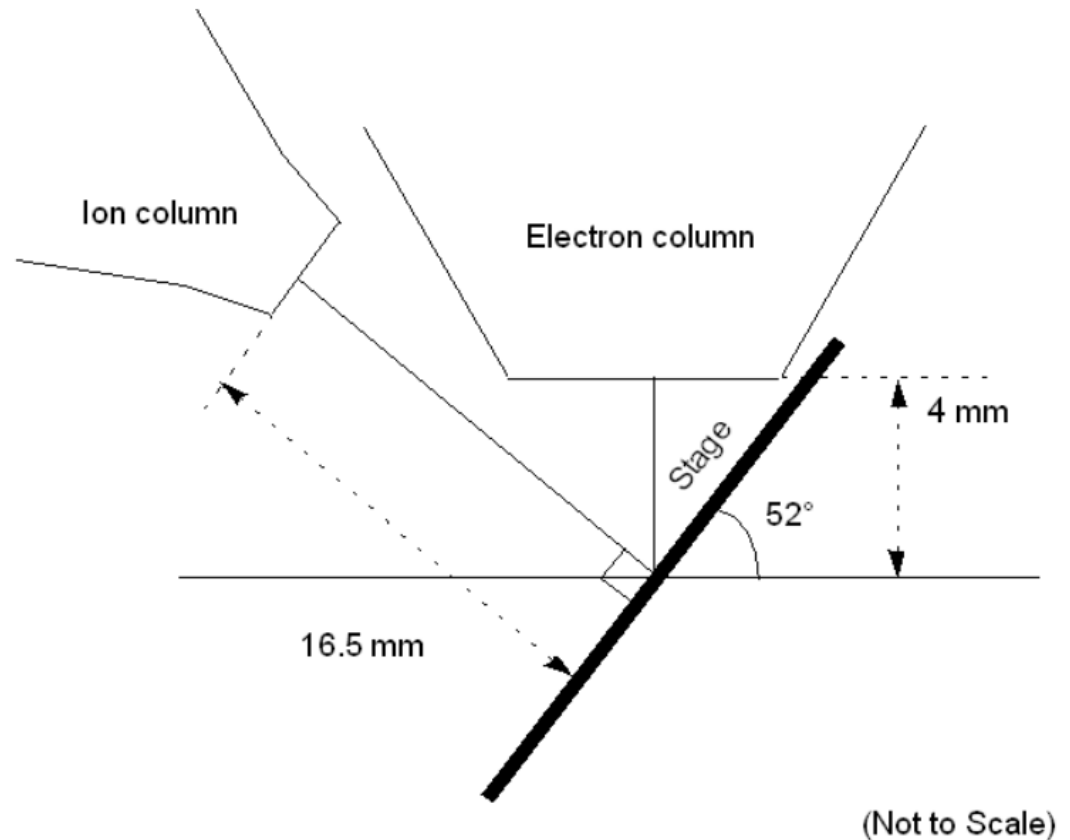
Установка FIB Helios 660



- ❖ Получение наноструктур с разрешением до 50 nm;
- ❖ Параллельное использование сканирующего электронного микроскопа.

Особенности работы с FIB

- ❖ Электронная и ионная колонны с магнитными линзами;
- ❖ Платформа с образцом может перемещаться в 3-х измерениях и вращаться в 2-х;
- ❖ Быстрое переключение между режимами бомбардировки ионами (*процесс фрезеровки*) и бомбардировкой электронами (*режим СЭМ*).



В презентации использованы материалы из следующих работ

- Физика твёрдого тела. Ашкрофт Н., Мермин Н.
- Электроны в неупорядоченных средах.
Гантмахер В. Ф. ФИЗМАТЛИТ, 2005
- Бакалаврская работа Борисова А.Э.
- Oscillating planar Hall response in bulk crystal of topological insulator Sn doped $\text{Bi}_{1.1}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$. doi: 10.1063/1.5031906