

Галиуллин Арслан
руководитель Кунцевич А. Ю.
рецензент Тихонов Е. С.
защита диплома

управление рассеянием в краевых состояниях двумерного топологического изолятора



кафедра физики низких температур, ФИАН

16 июня 2021

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева

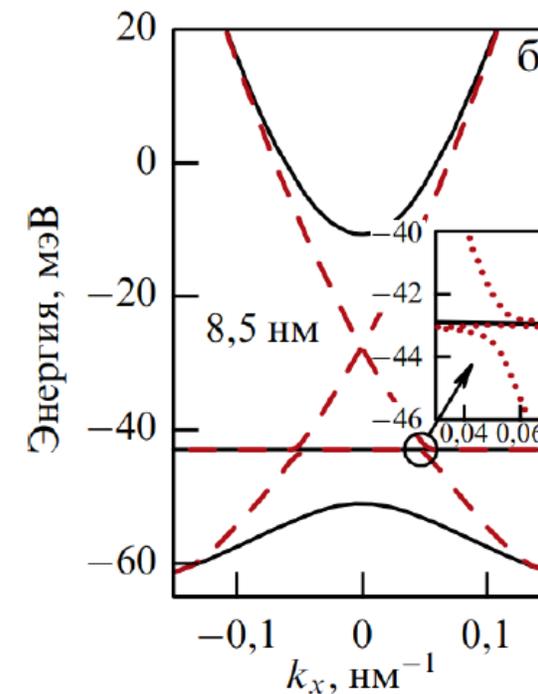
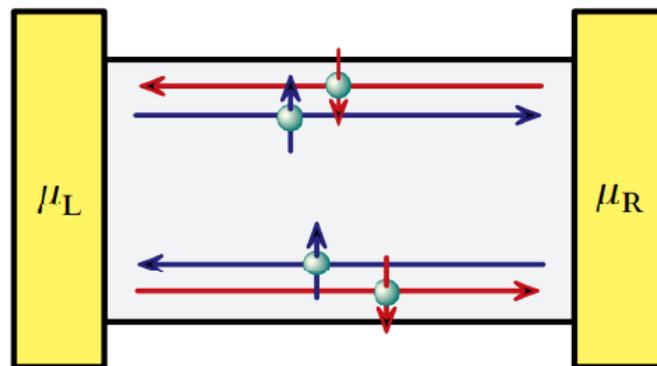


Российской академии наук

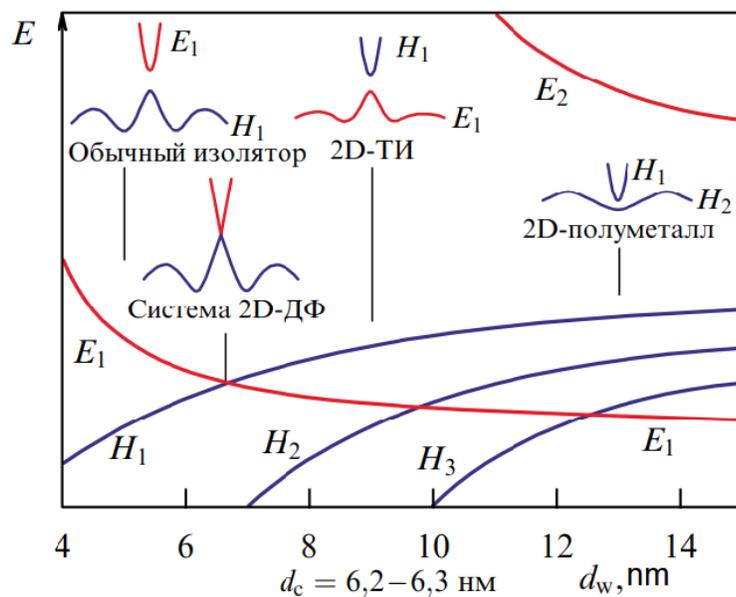
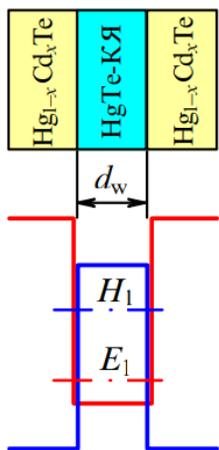
Ф И А Н

краевые состояния

Kvon et. al. "Topological insulator based on HgTe", Phys. Usp., 2020

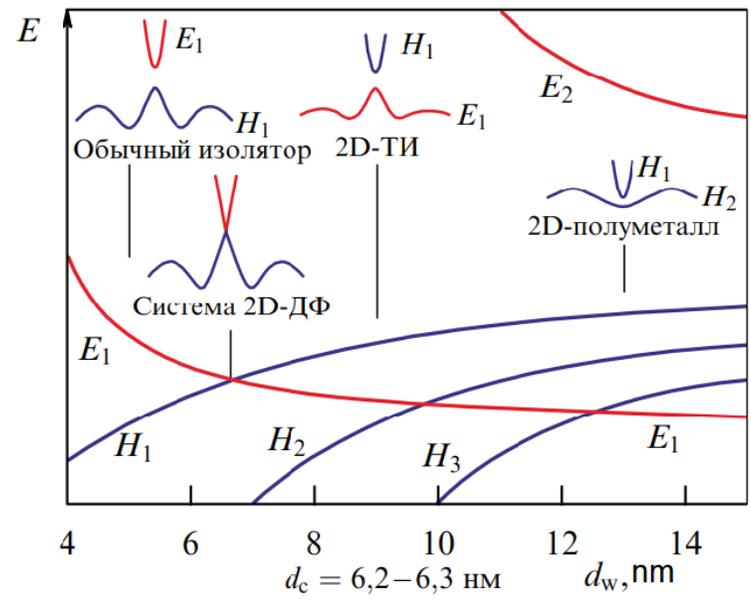
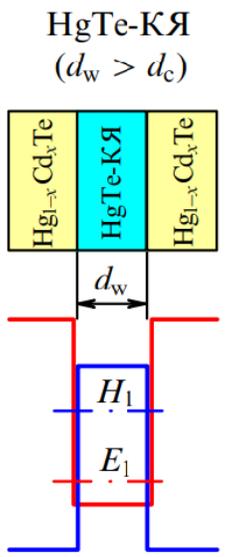
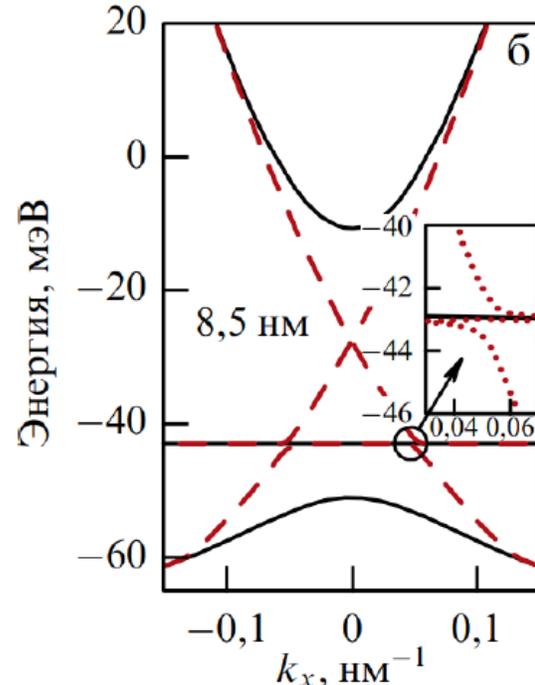
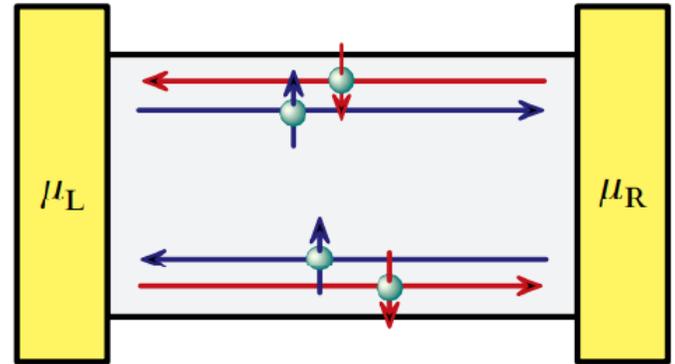


HgTe-КЯ
($d_w > d_c$)



краевые состояния

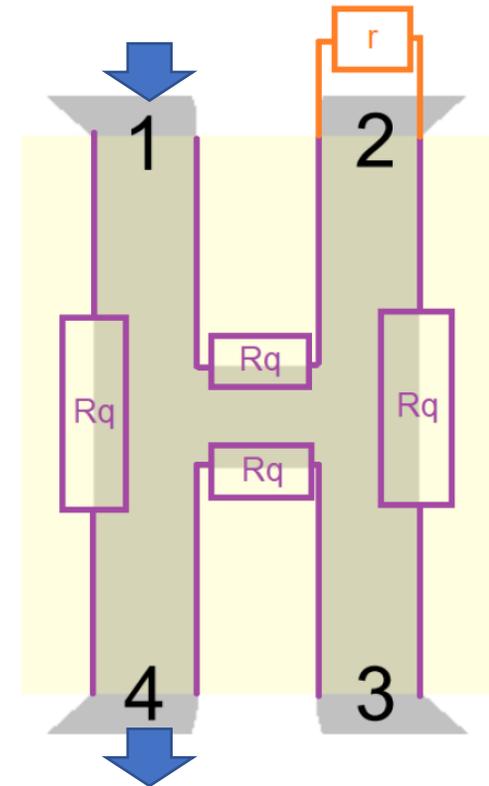
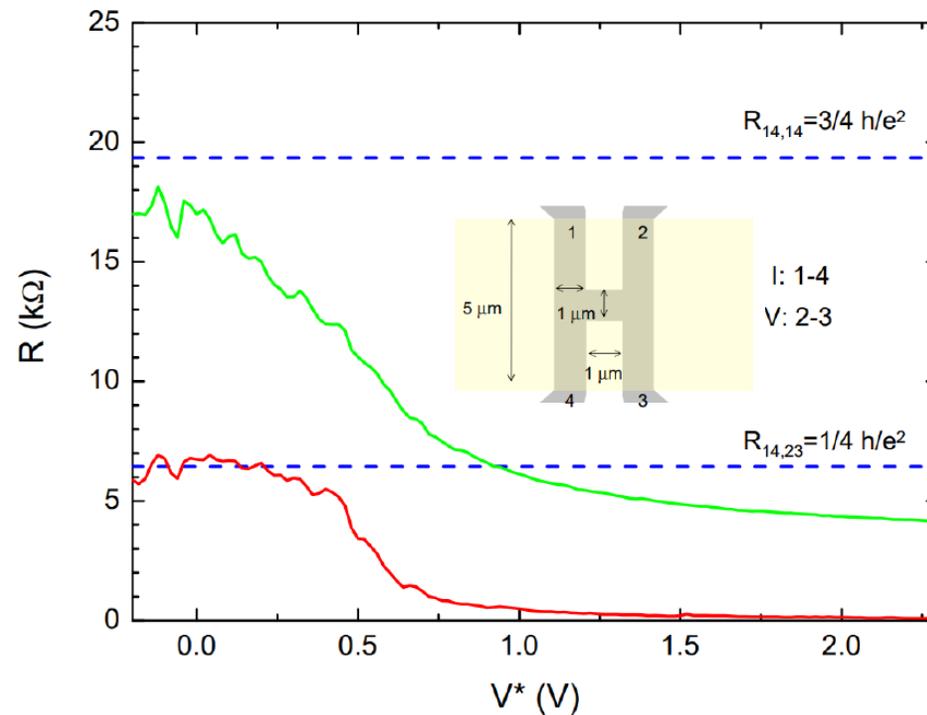
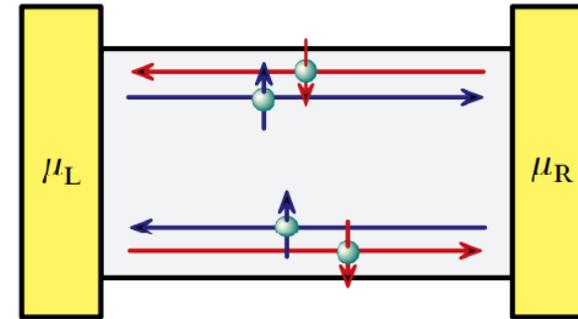
Kvon et. al. "Topological insulator based on HgTe", Phys. Usp., 2020



- 1) инвертированный спектр
- 2) спин-орбитальное взаимодействие
- 3) инверсия по времени

Hasan, Kane "Colloquium: Topological insulators", Rev. Mod. Phys., 2010

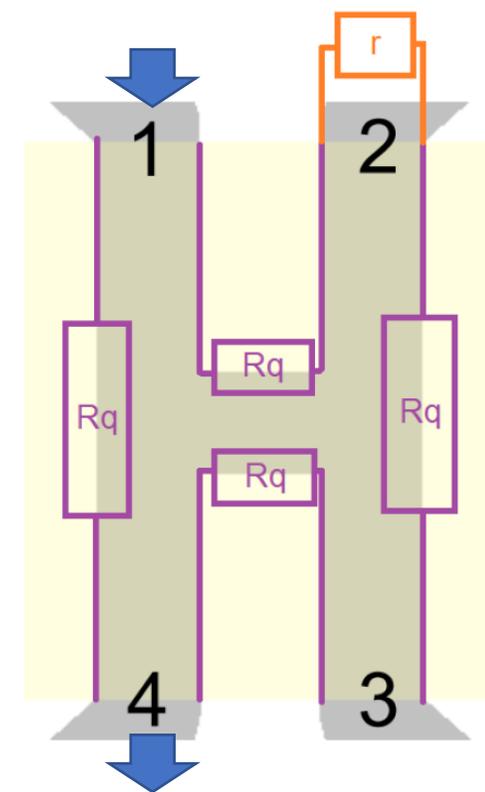
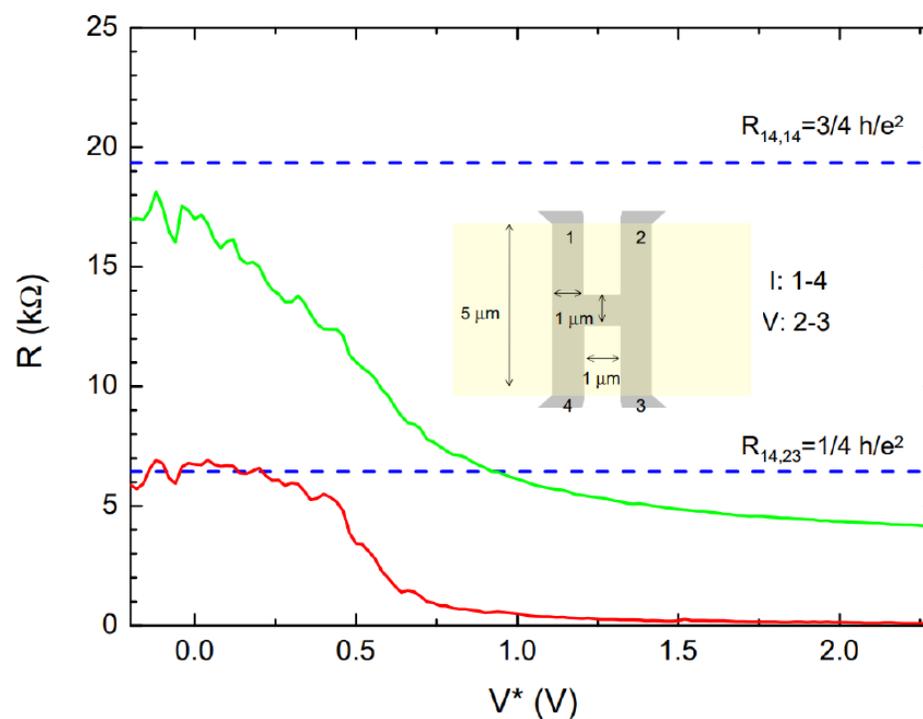
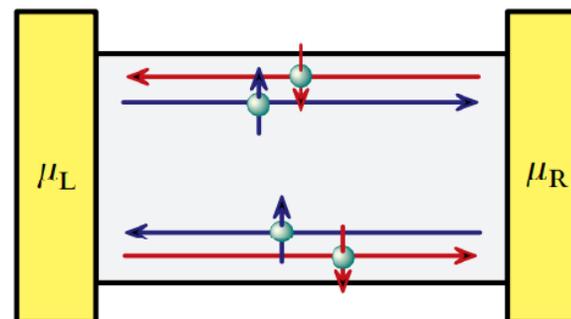
наблюдение краевых состояний



Roth et. al. "Nonlocal transport in the quantum spin hall state", Science, 2009

наблюдение краевых состояний

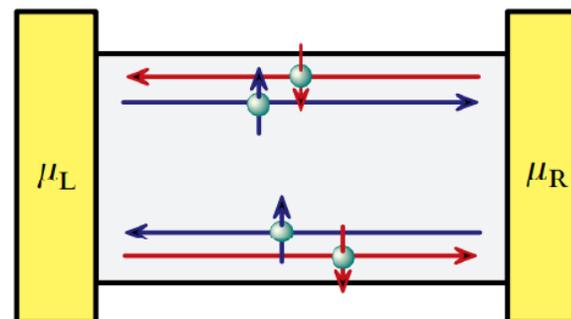
только для микронных
размеров



Roth et. al. "Nonlocal transport
in the quantum spin hall state",
Science, 2009

наблюдение краевых состояний

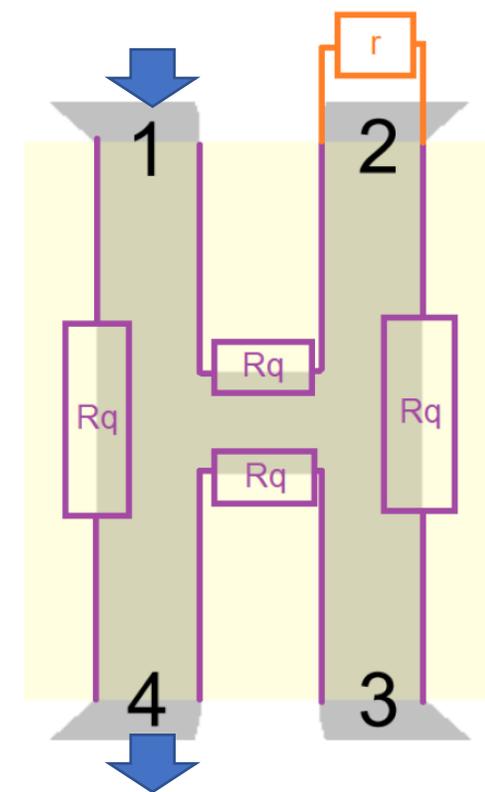
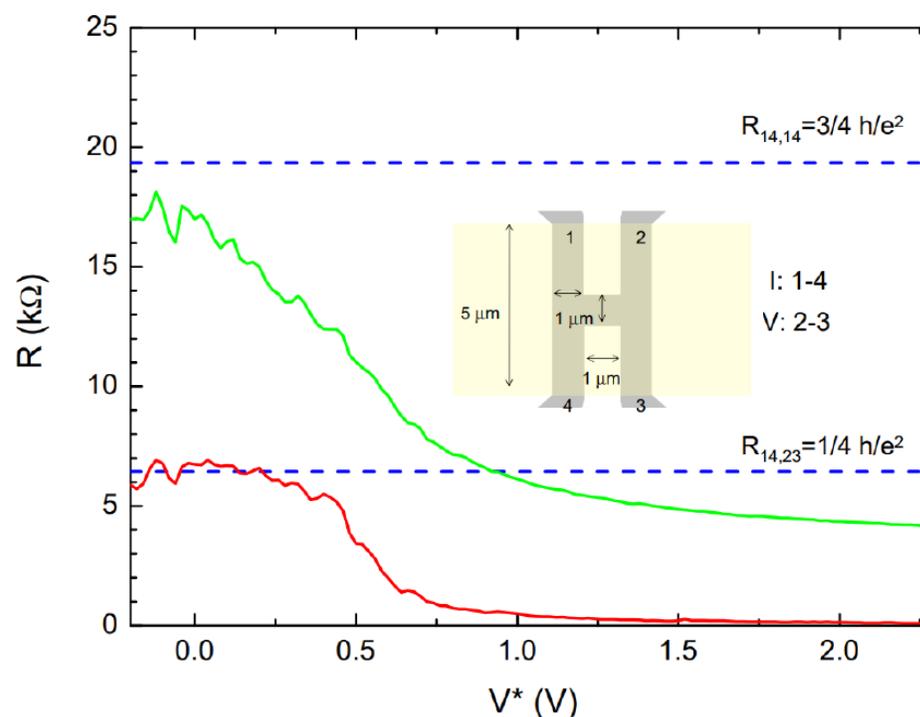
только для микронных
размеров



но! локализация,
для больших – рассеяние

но по теории не должно быть!

Roth et. al. “Nonlocal transport
in the quantum spin hall state”,
Science, 2009



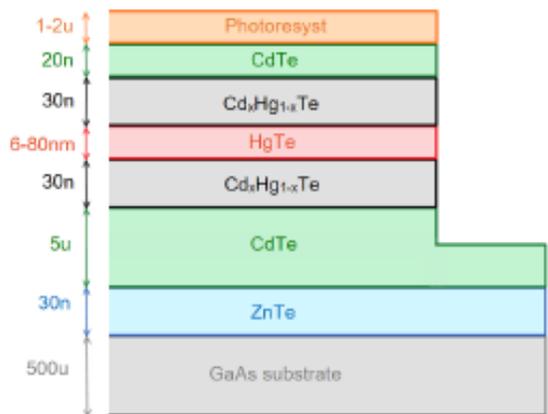
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1 научиться создавать полевые структуры с КЯ HgTe, пронаблюдать в них нелокальный транспорт

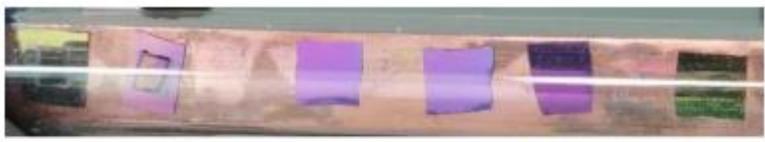
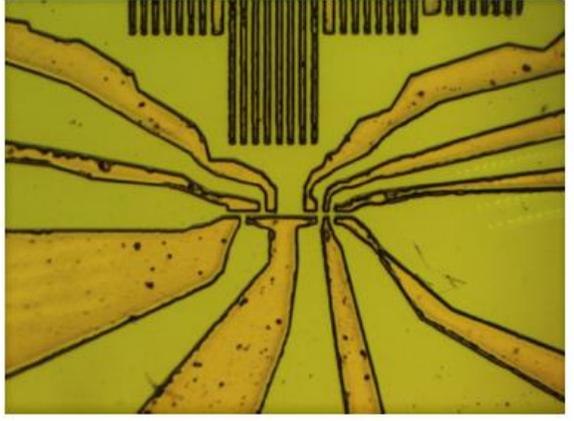
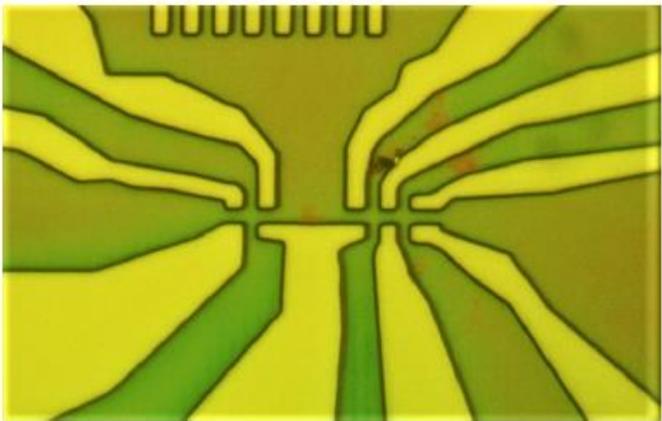
2 изготовить структуру с макроскопически длинным краем, исследовать транспорт в ней

3 освоить изготовление наноструктурированного края на АСМ, ФИПе

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ



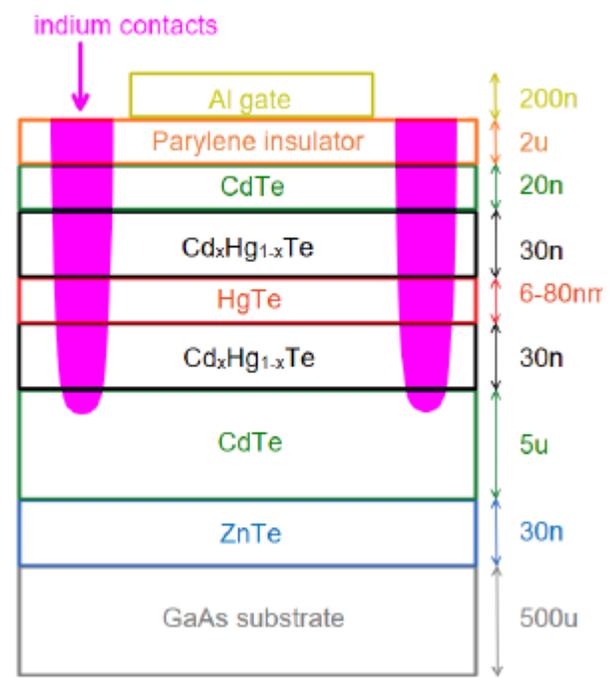
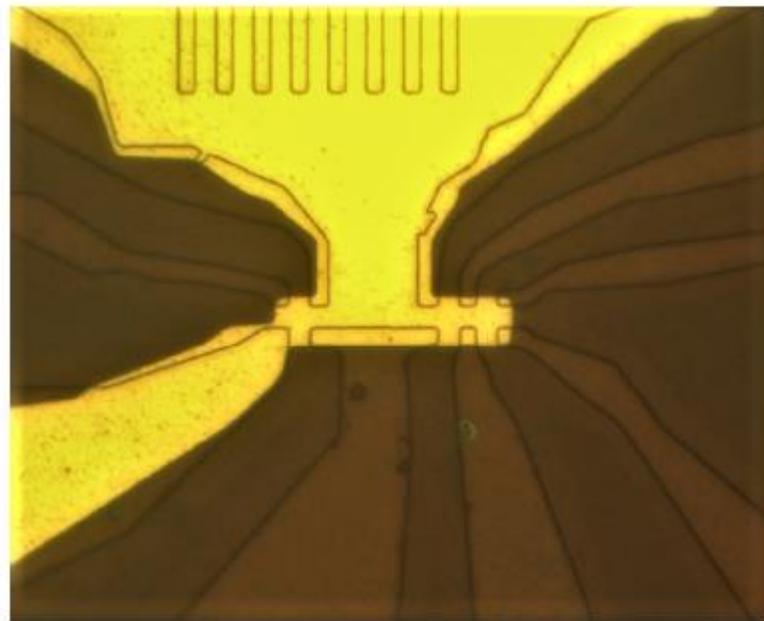
a



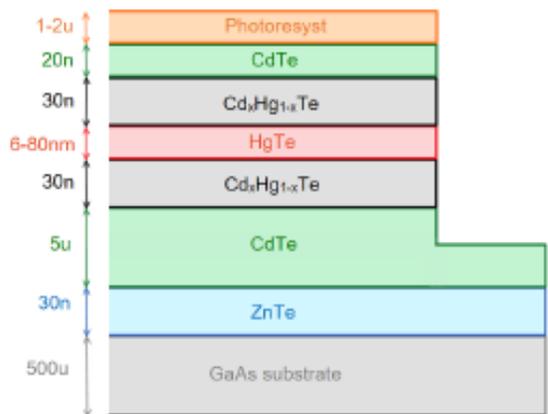
a



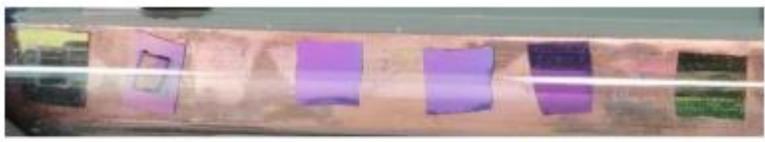
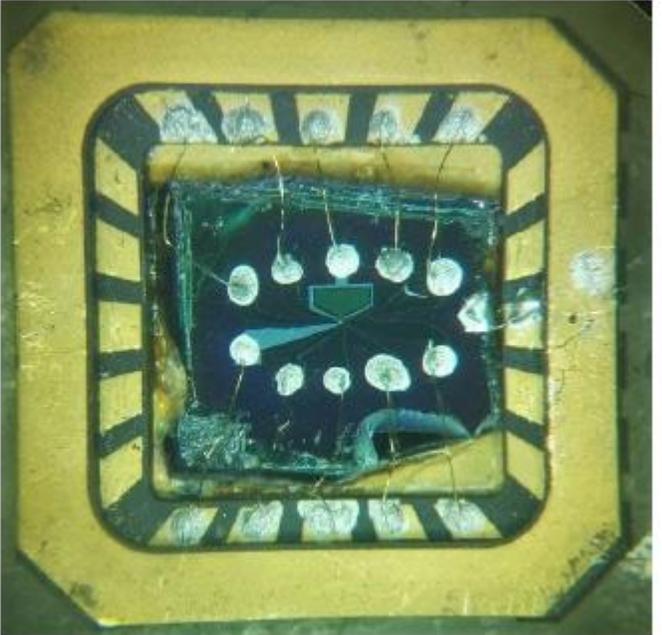
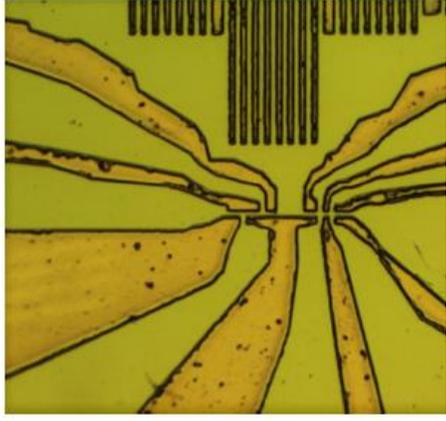
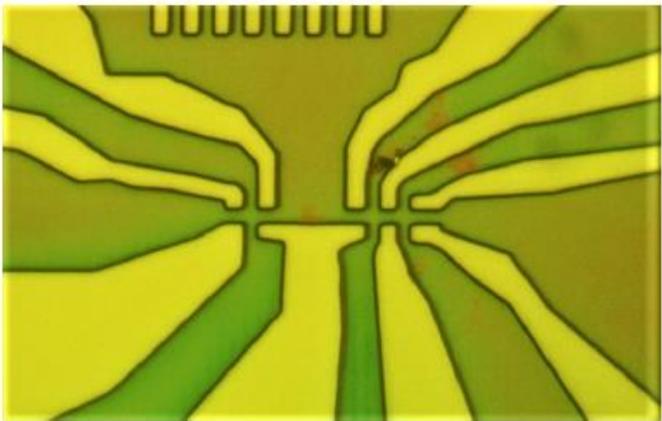
b



ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ



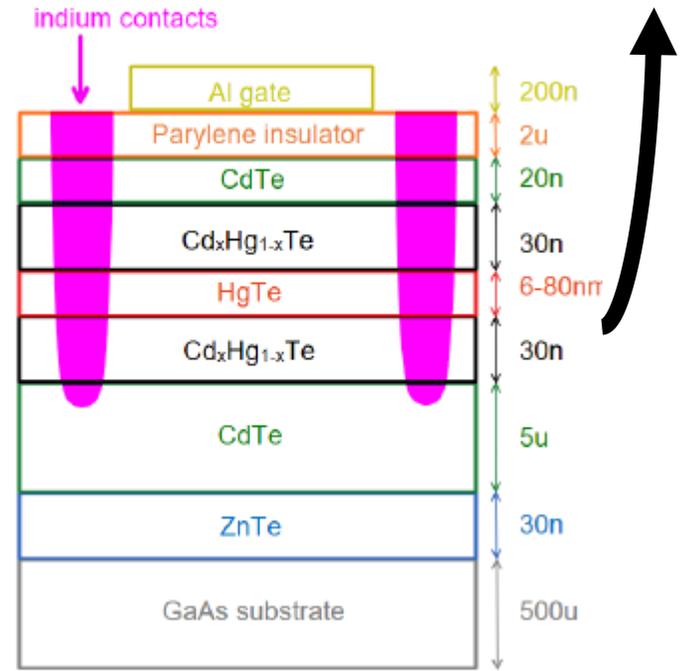
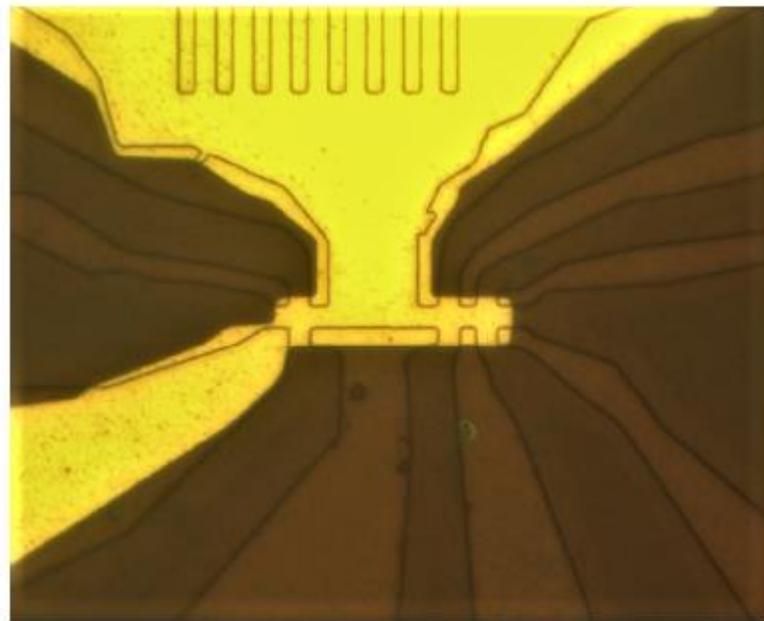
a



a



b



измерения

одна пластина 7,6 нм КРТ 160203;

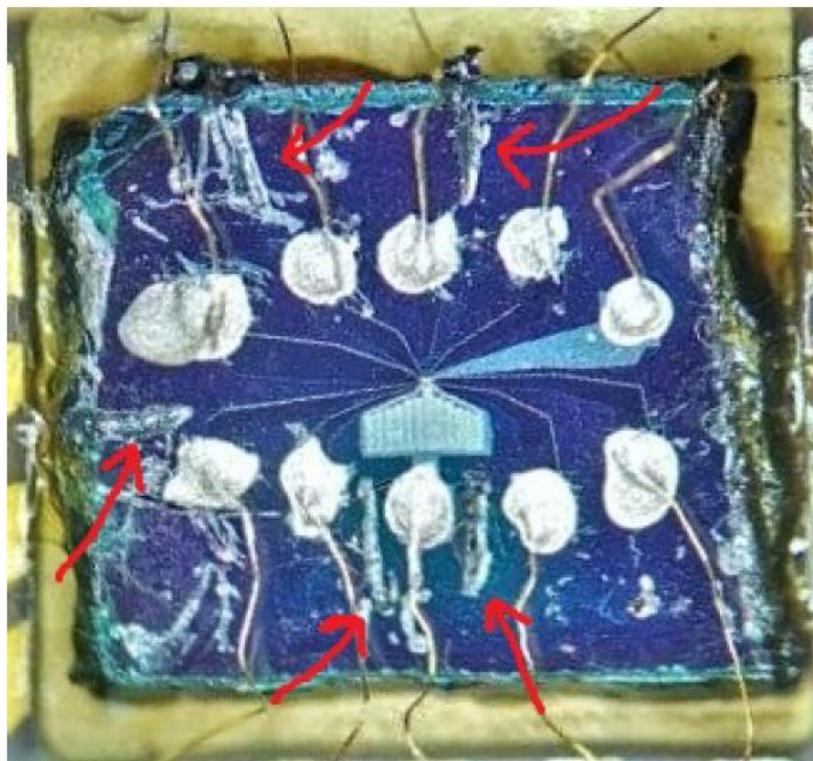
- 1) структура типа **мостика Холла**
(магнитотранспортные, температурные, затворные измерения)

проводимость через подложку

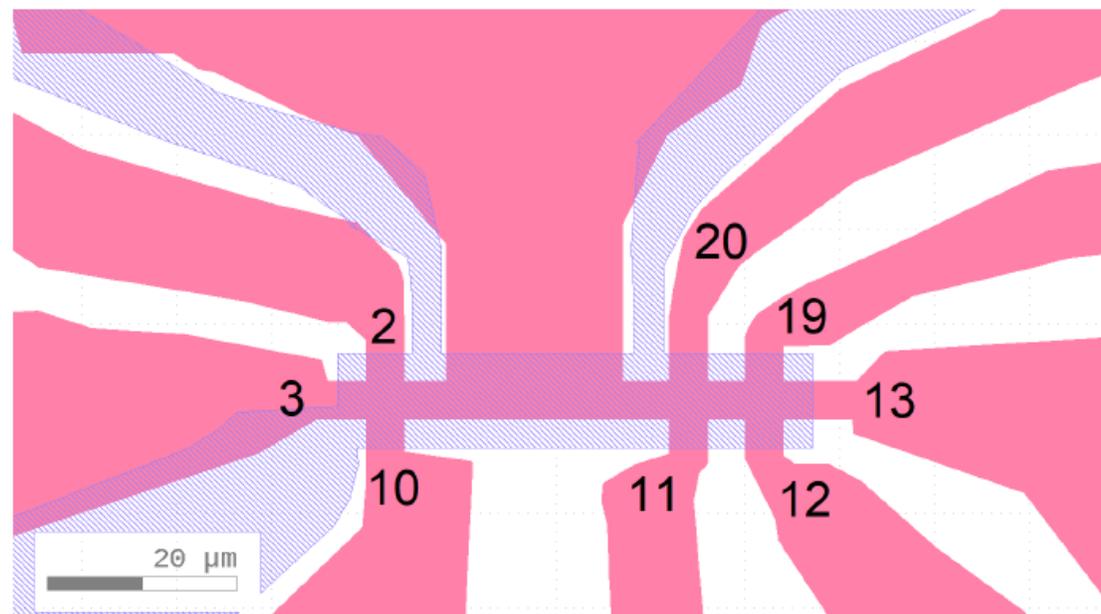
- 2) структура с **длинным краем** (локальные, нелокальные измерения)

структура типа мостика Холла

проводимость по стравленной области

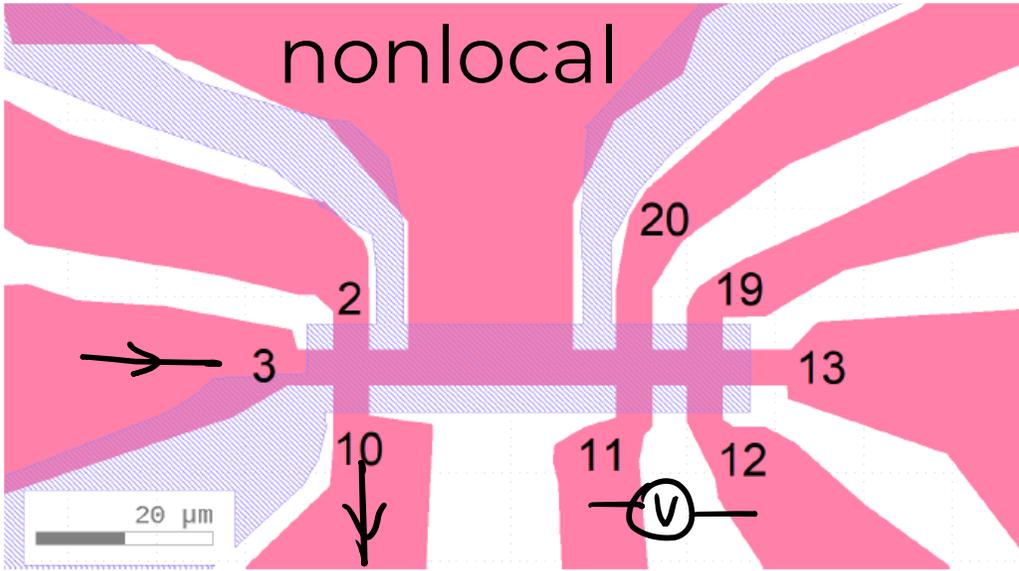
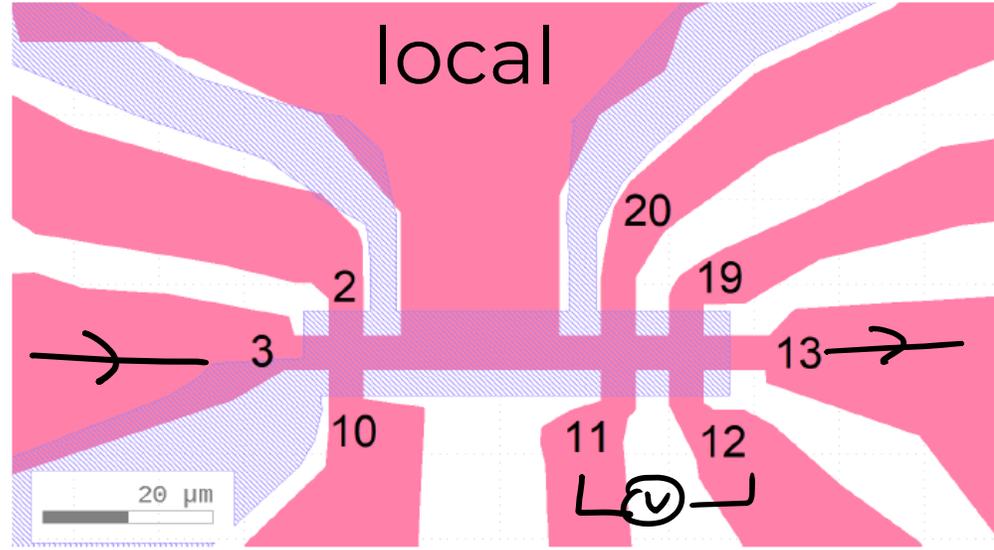
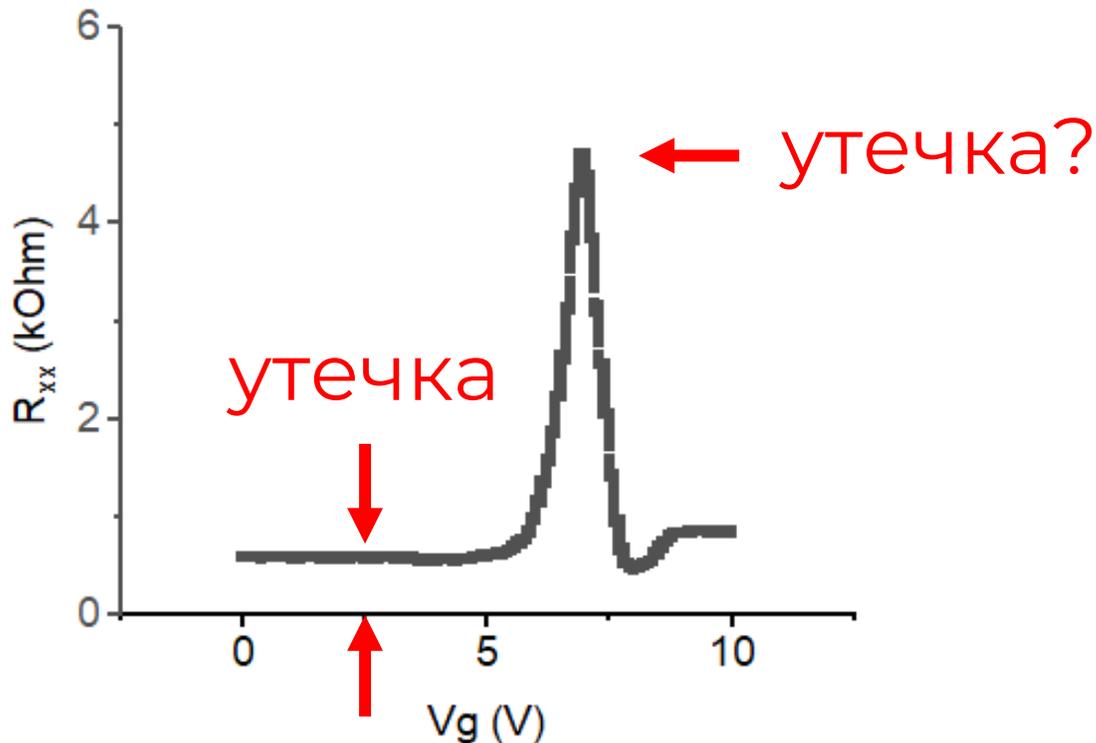
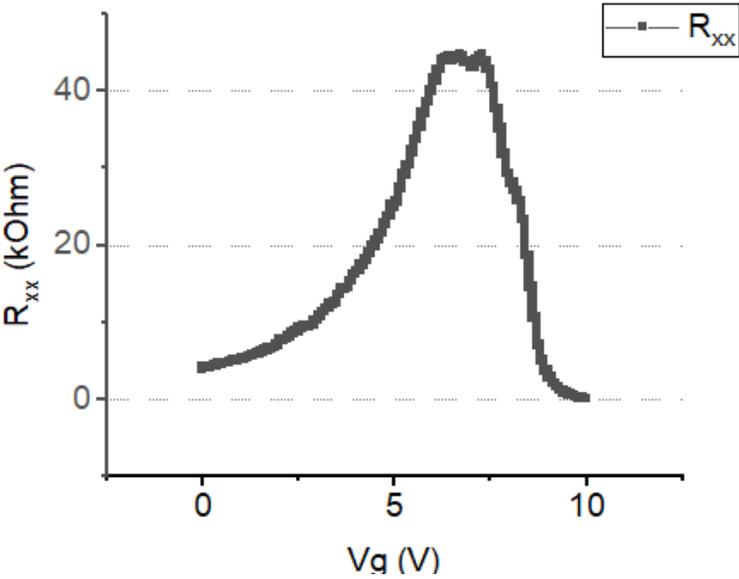


5mm

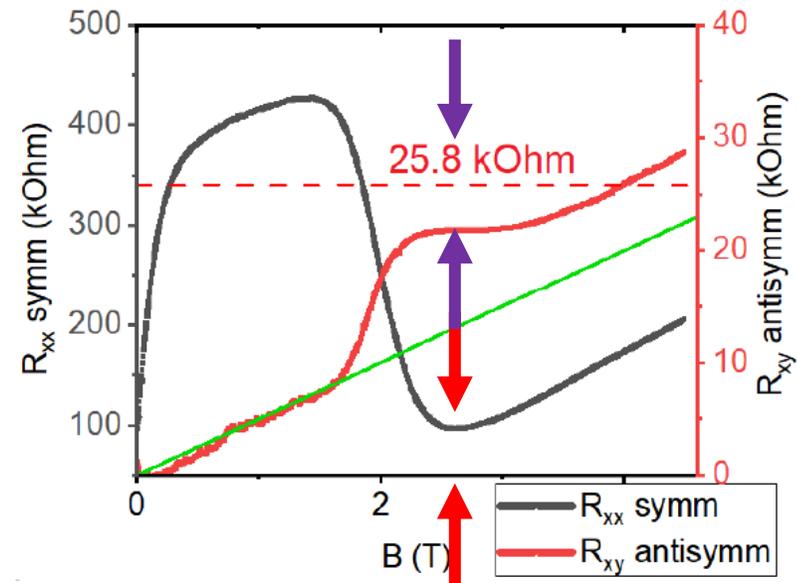


5mm

измерения (3К)

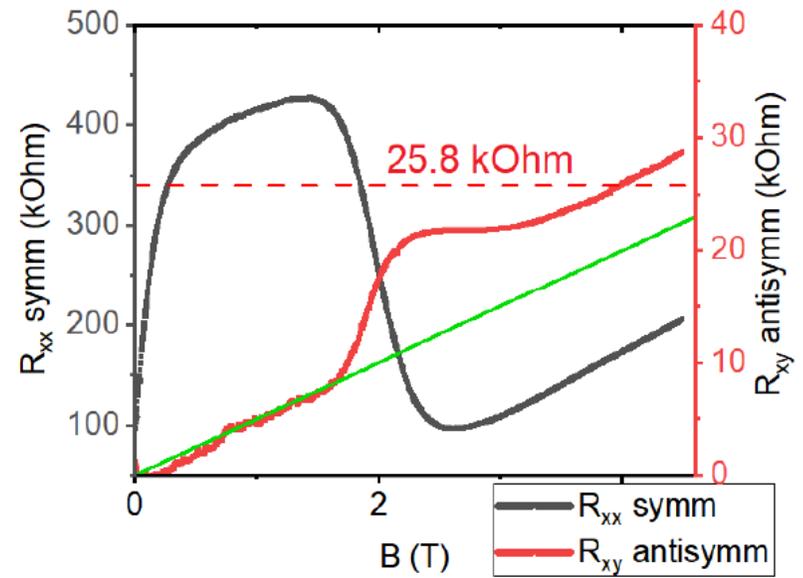
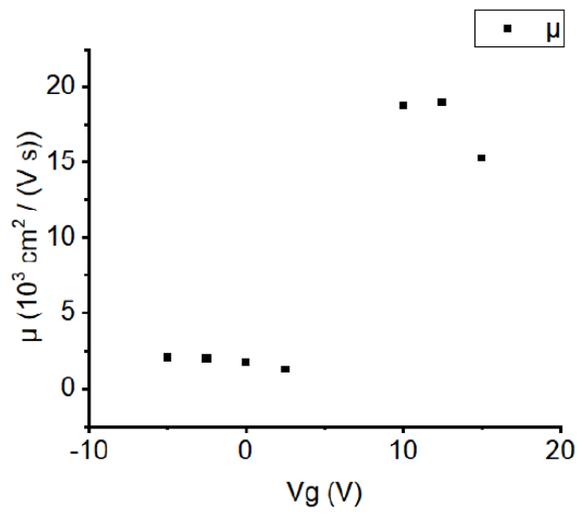
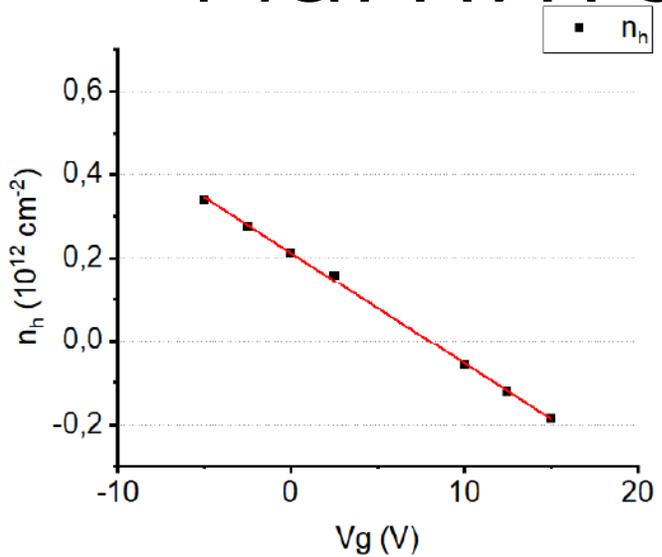


магнитотранспортные измерения



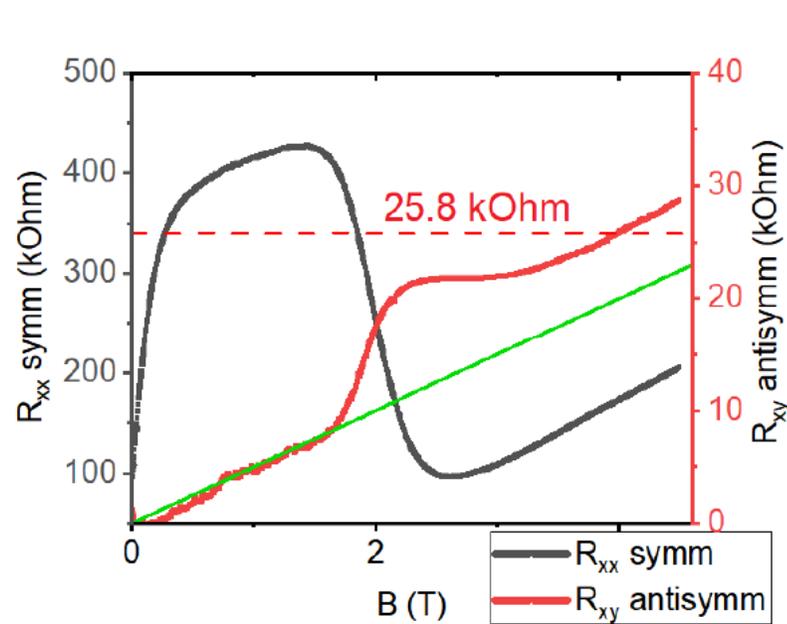
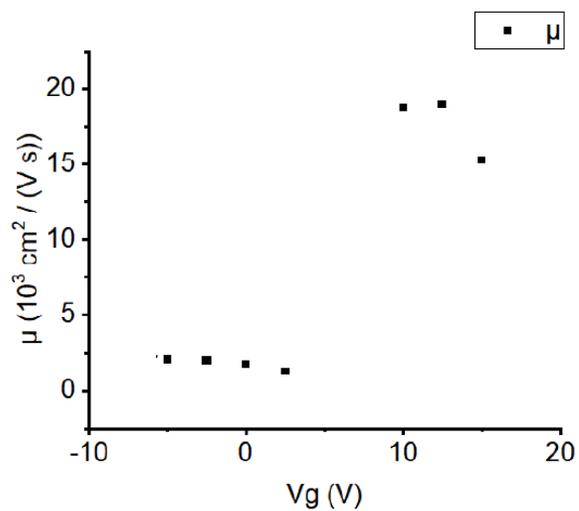
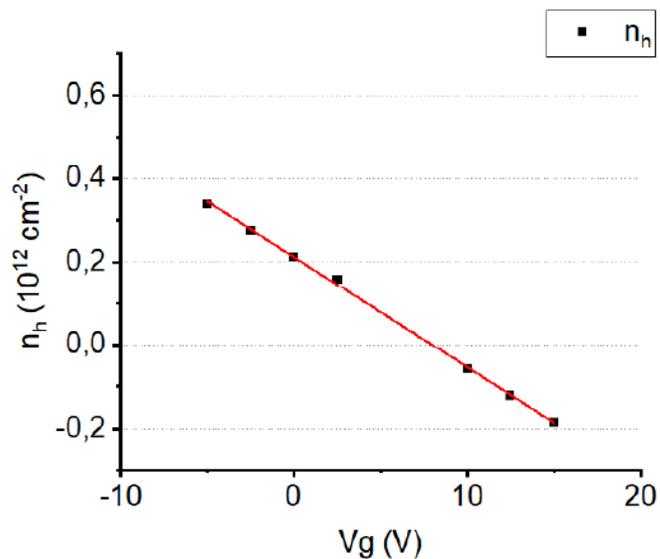
(a) $V_g = +6$ V

МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

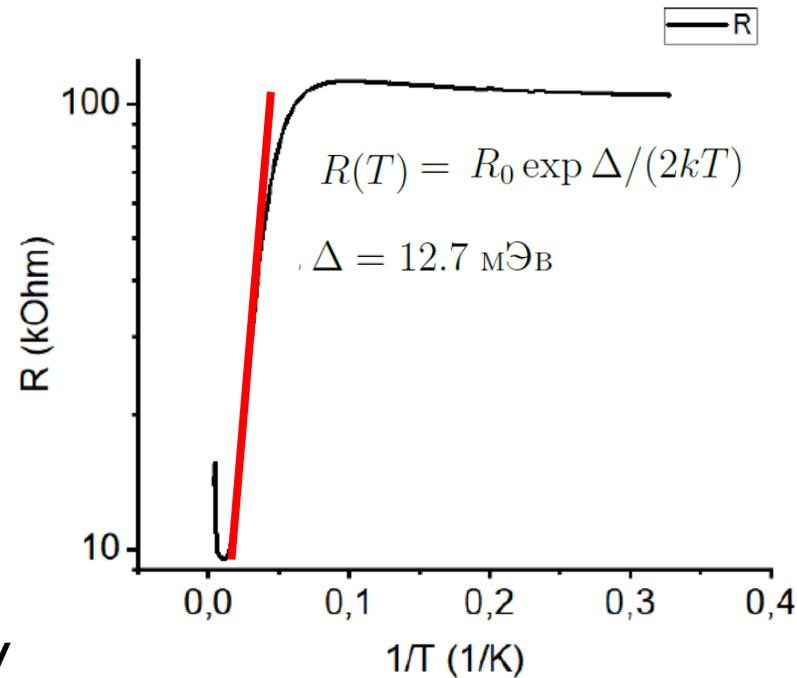


(a) $V_g = +6 \text{ V}$

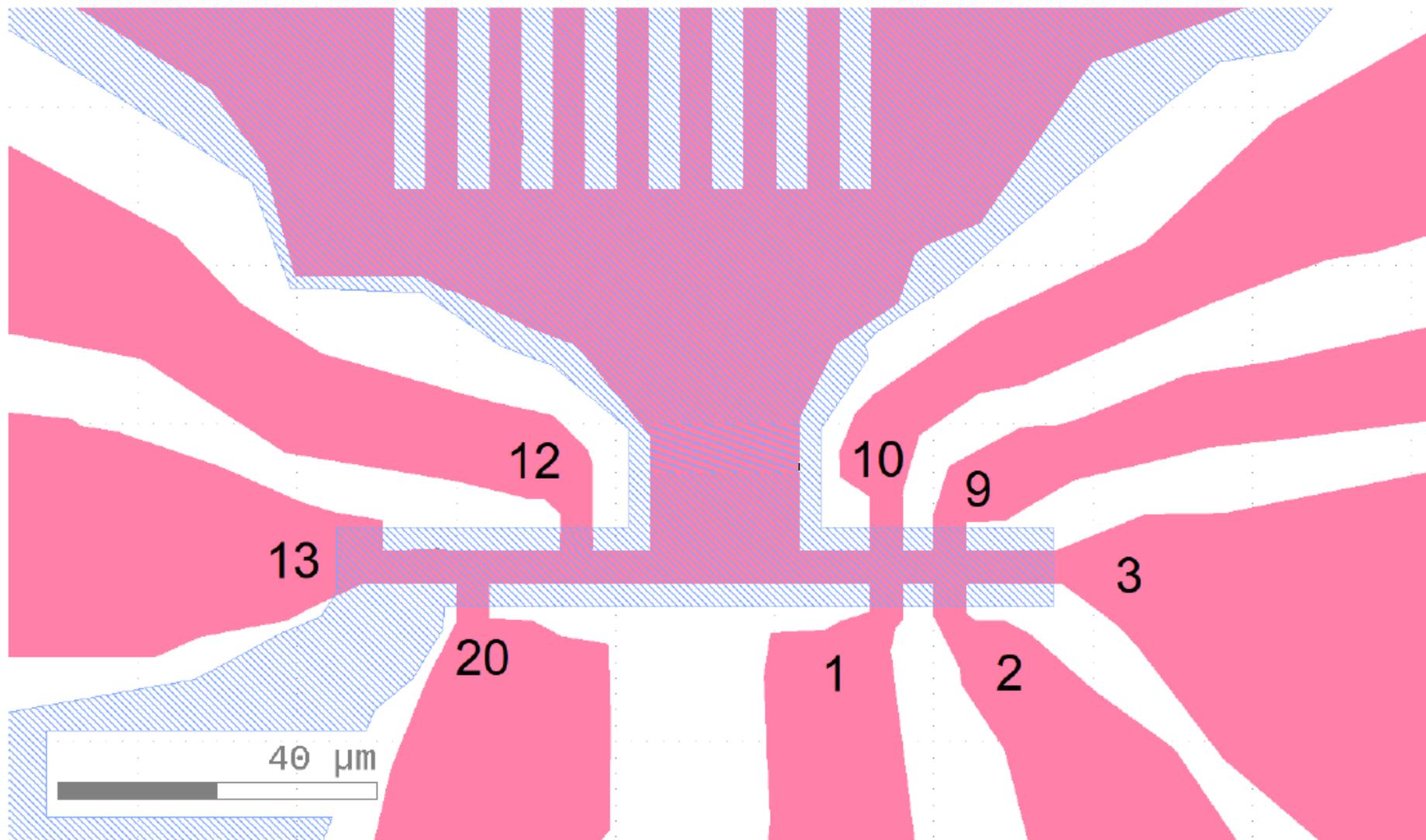
магнитотранспортные измерения, температурная зависимость сопротивления



(a) $V_g = +6 \text{ V}$

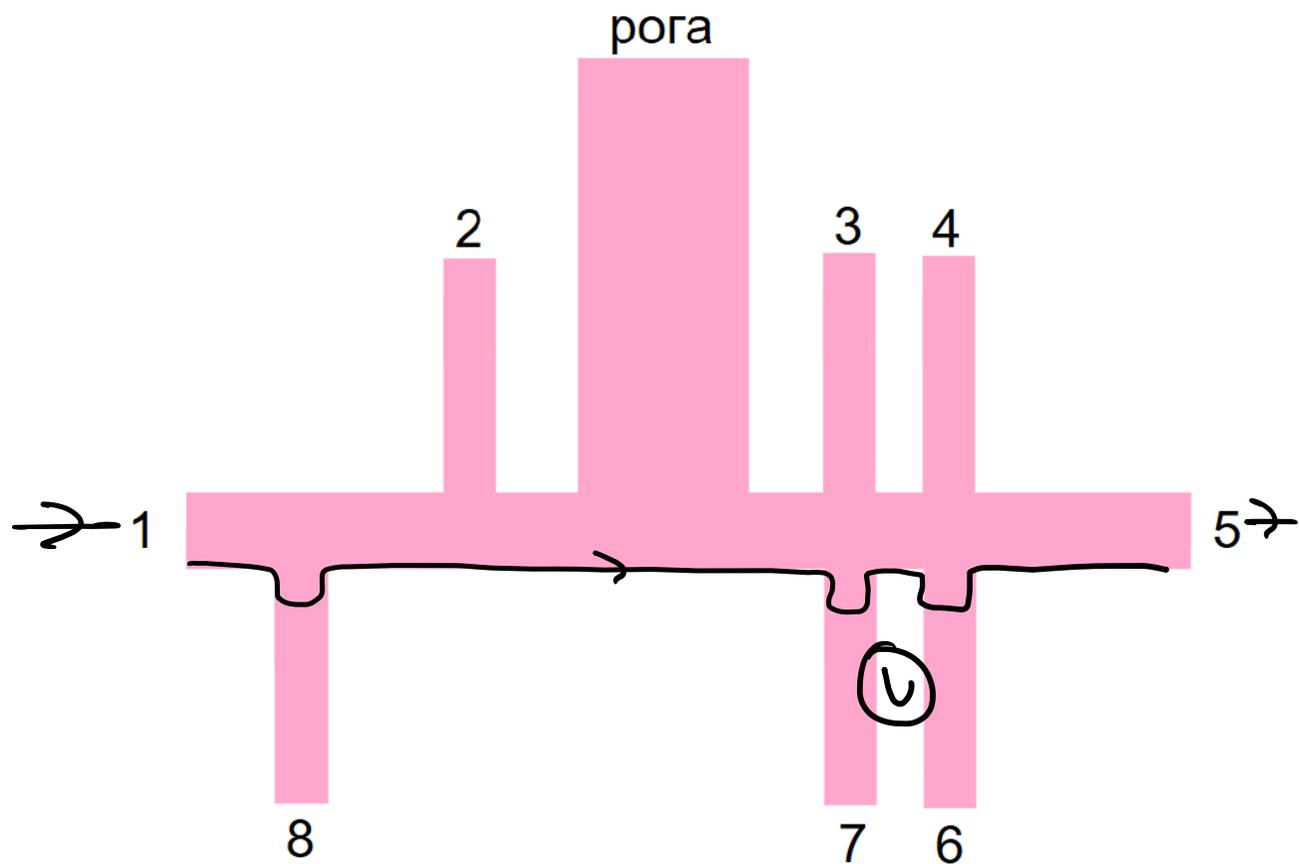


длинный край



длинный край

$$R_{15,76} \gtrsim R_q$$

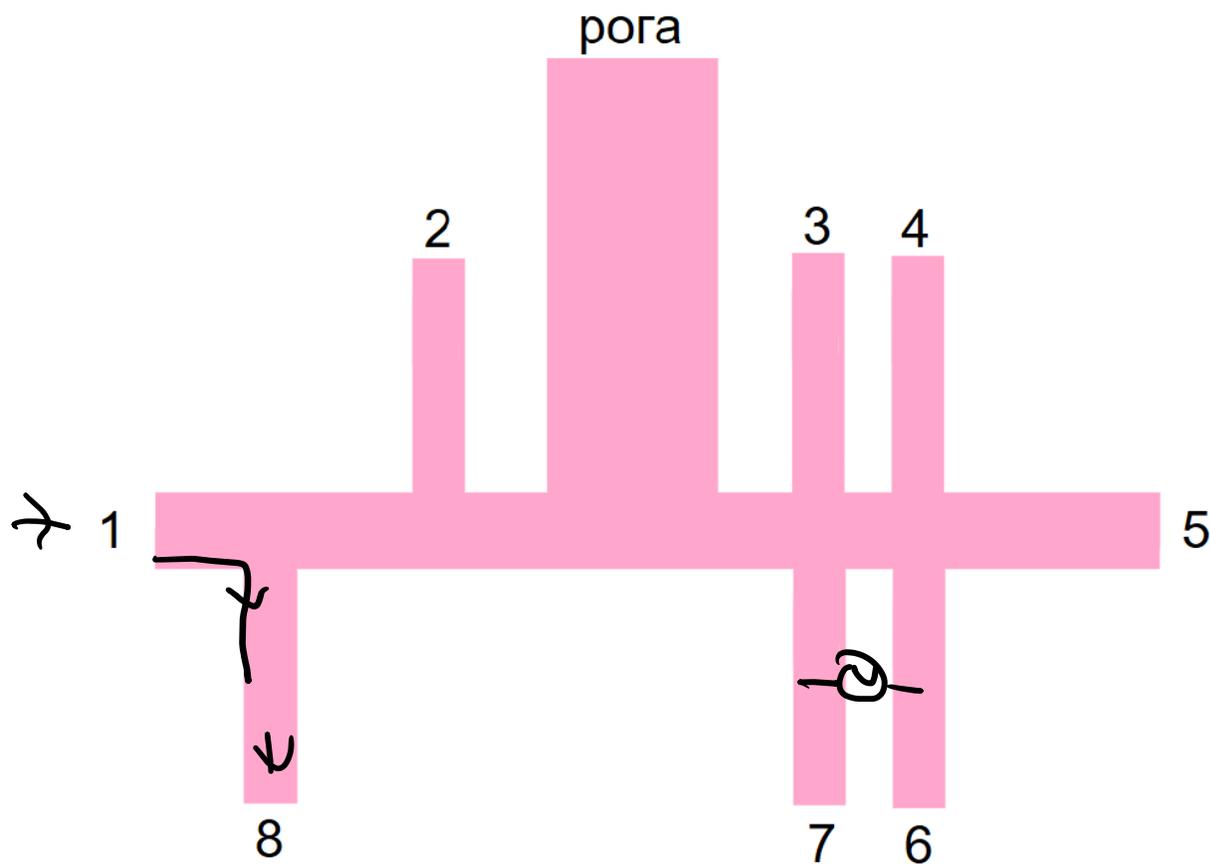


длинный край

$$R_{15,76} \gtrsim R_q$$

$$R_{15,34} \ll R_q$$

$$R_{18,76} \ll R_q$$



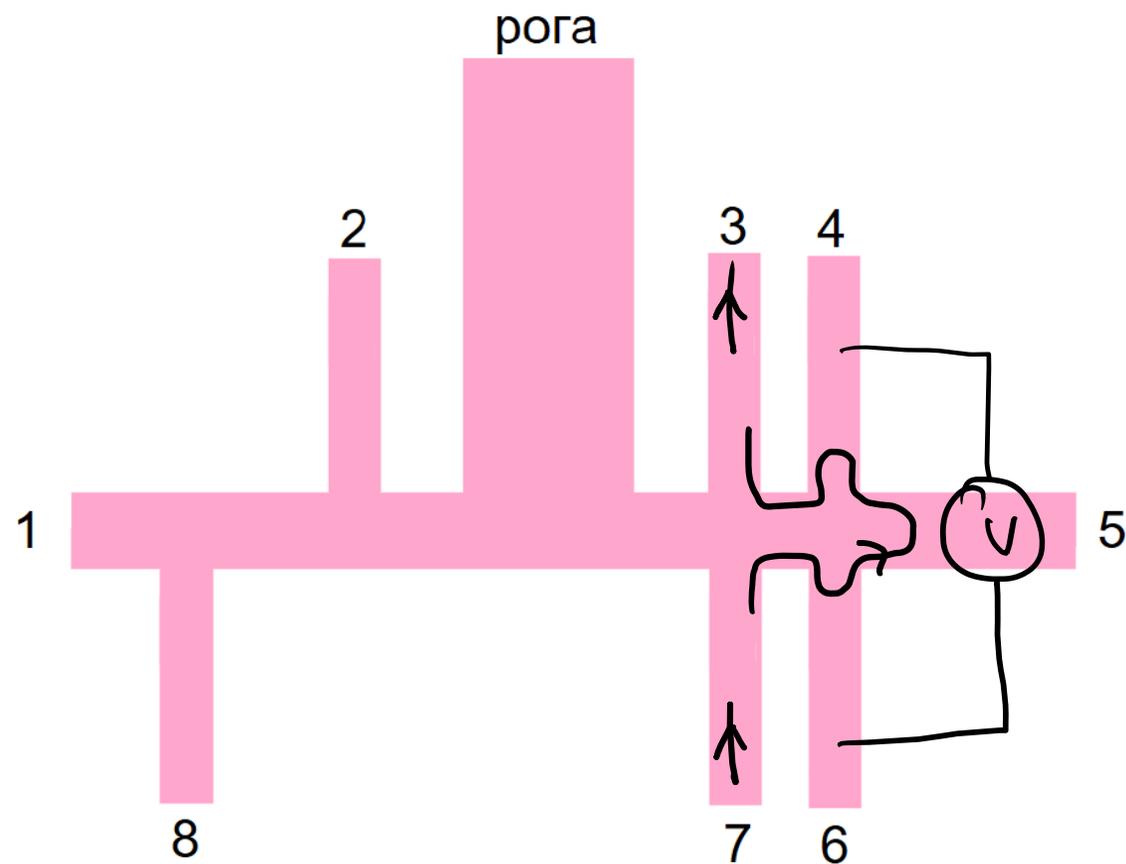
длинный край

$$R_{15,76} \gtrsim R_q$$

$$R_{15,34} \ll R_q$$

$$R_{18,76} \ll R_q$$

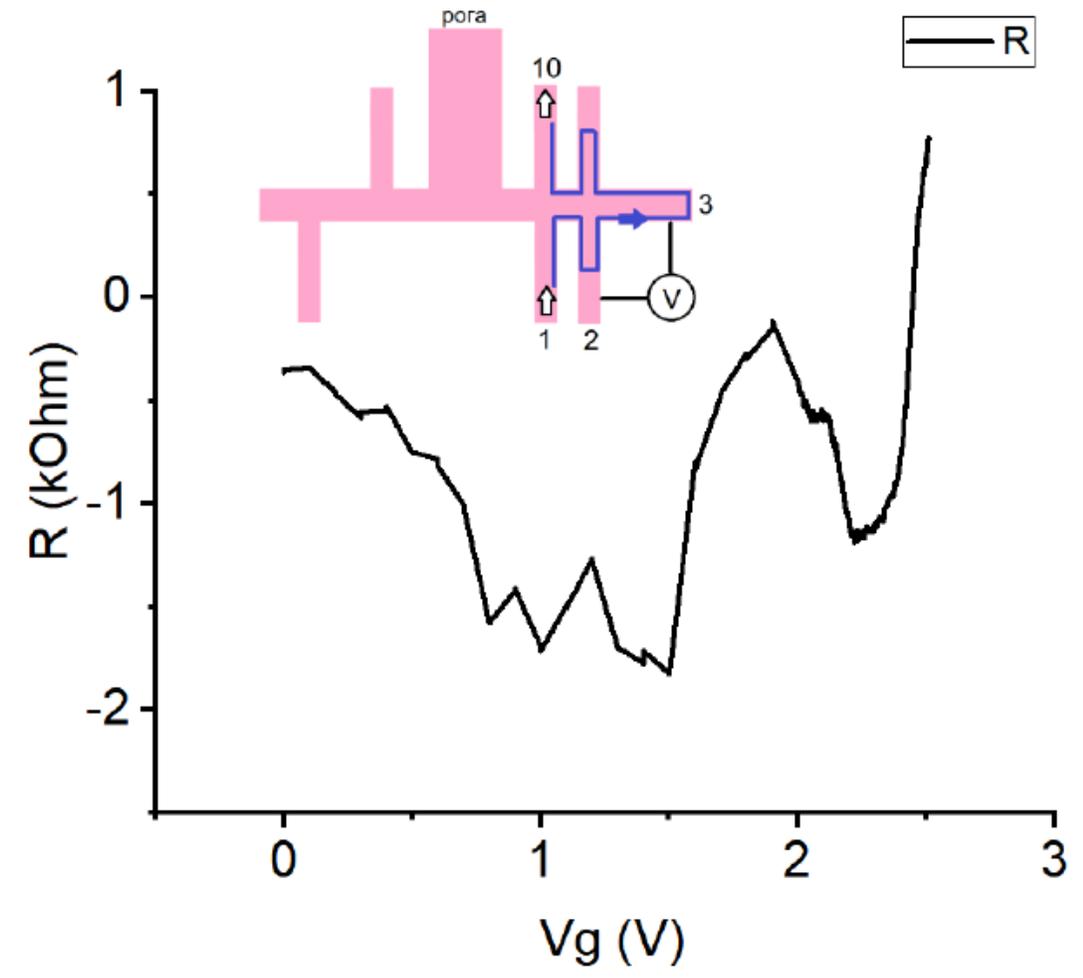
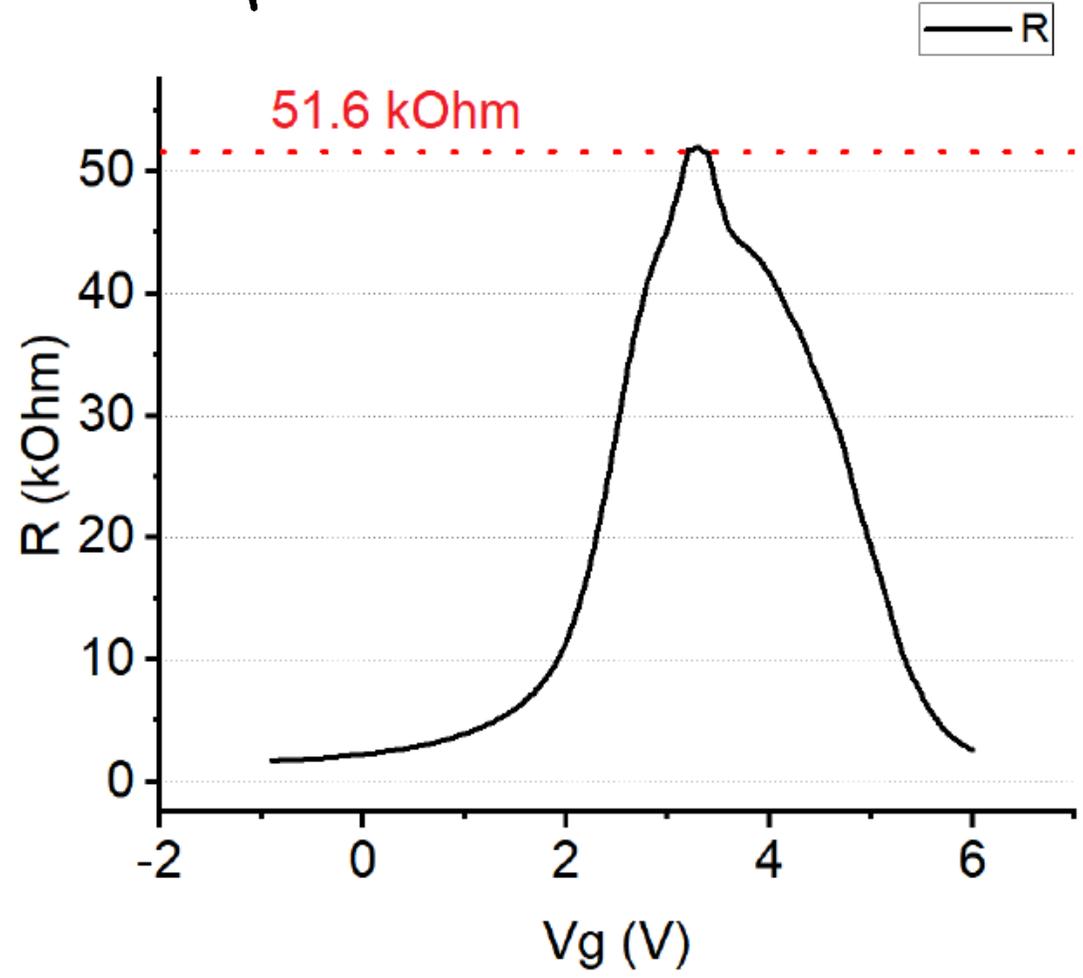
$$R_{73,64} \gtrsim R_q$$



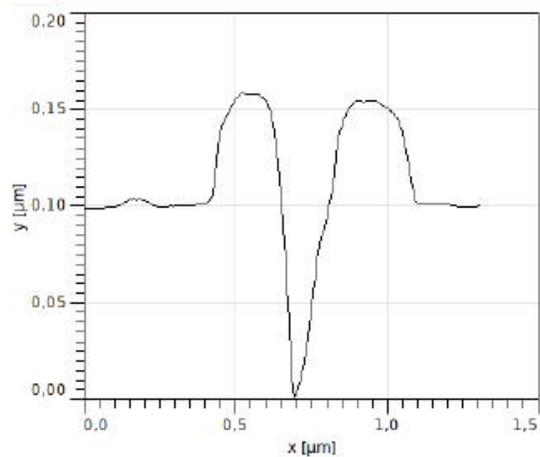
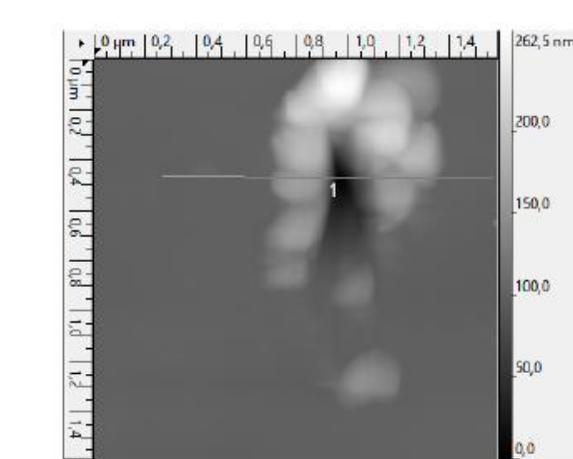
локальные и нелокальные

краевые $\approx R_q$

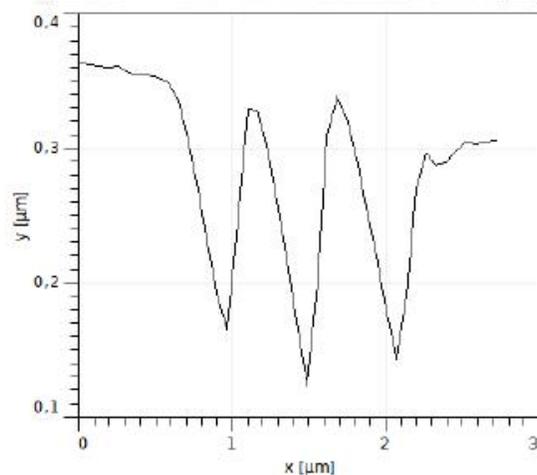
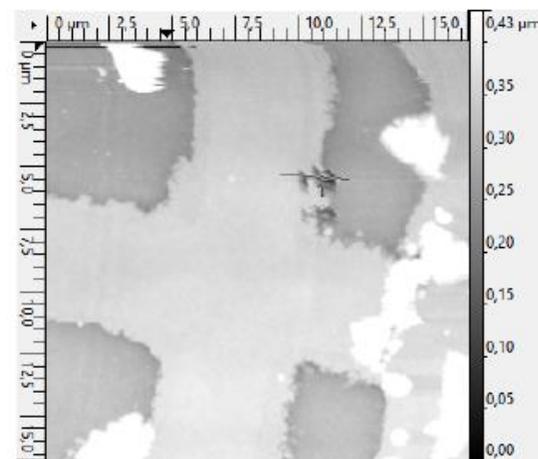
краевых нет!



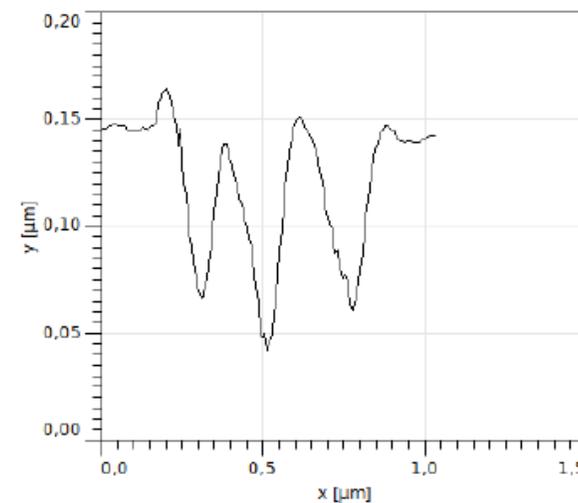
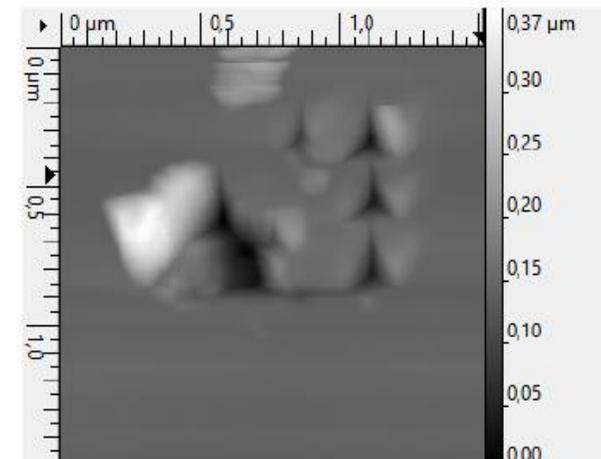
нанофабрикация АСМ, ФИП



острая игла, >15 Н/м



1.1пА, 10кВ, слой парилена алюминия



треугольный кантилевер

Выводы

отработаны все технологические этапы изготовления полевых структур из КЯ HgTe. проведены транспортные измерения

реализована геометрия структуры с длинным краем. показана проводимость канала в ТЗН порядка e^2/h и отсутствие нелокального транспорта

реализован метод нанолитографии края КЯ HgTe при помощи АСМ и ФИП

КОНЕЦ

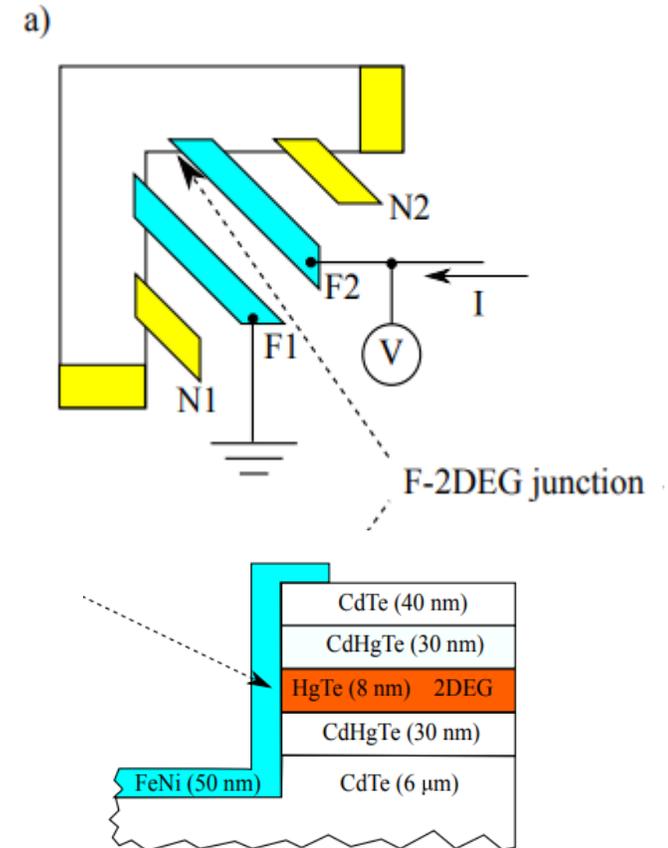
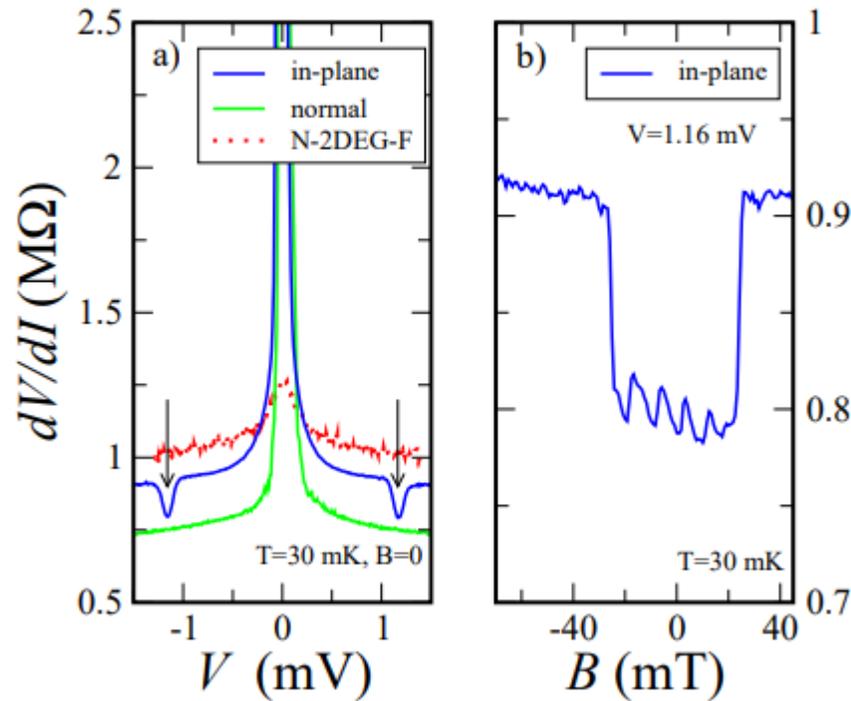
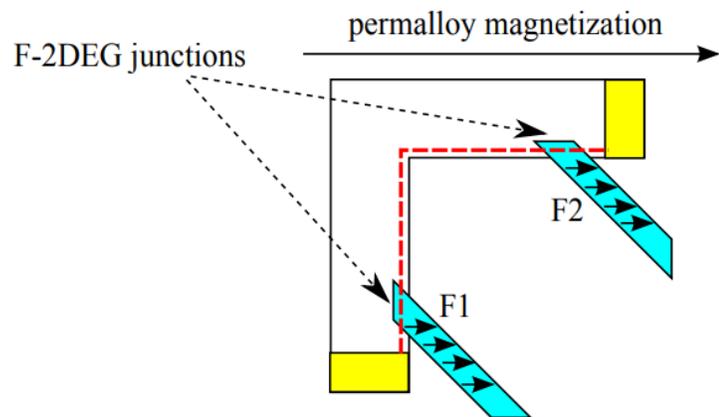


1. Вопреки заявленному во втором абзаце введения, в работе [8] не представлено экспериментальных данных по нелокальному транспорту.

Полностью согласен, это ошибка

2. Непонятно, в чем именно состоит «Идея использования полной поляризации по спину инжектируемого тока» (последнее предложение на стр.20). В частности, нигде в тексте ВКР не обсуждается релаксация спина вне собственно краевых состояний.

Kononov et. al. “Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well” Jetp Lett, 2015



3. Как следует, например, из рис.6.1 перепад высот на границе мезы составляет по меньшей мере 0.5 мкм, в то время как глубина залегания квантовой ямы составляет примерно 100 нм (несмотря на неизвестную точно глубину залегания, она, по опыту рецензента не бывает больше даже 200 нм). Каким же образом в эксперименте может проявляться недотрав областей макроскопических размеров?

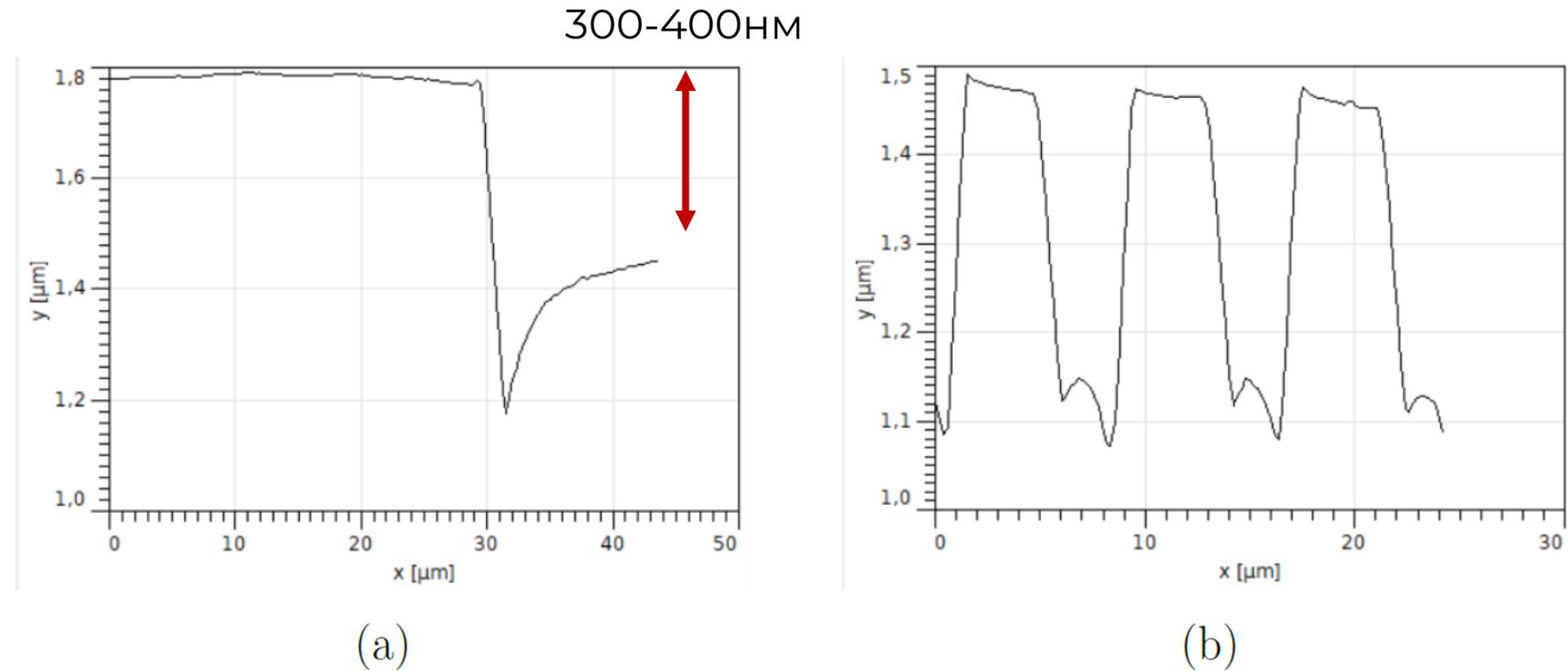
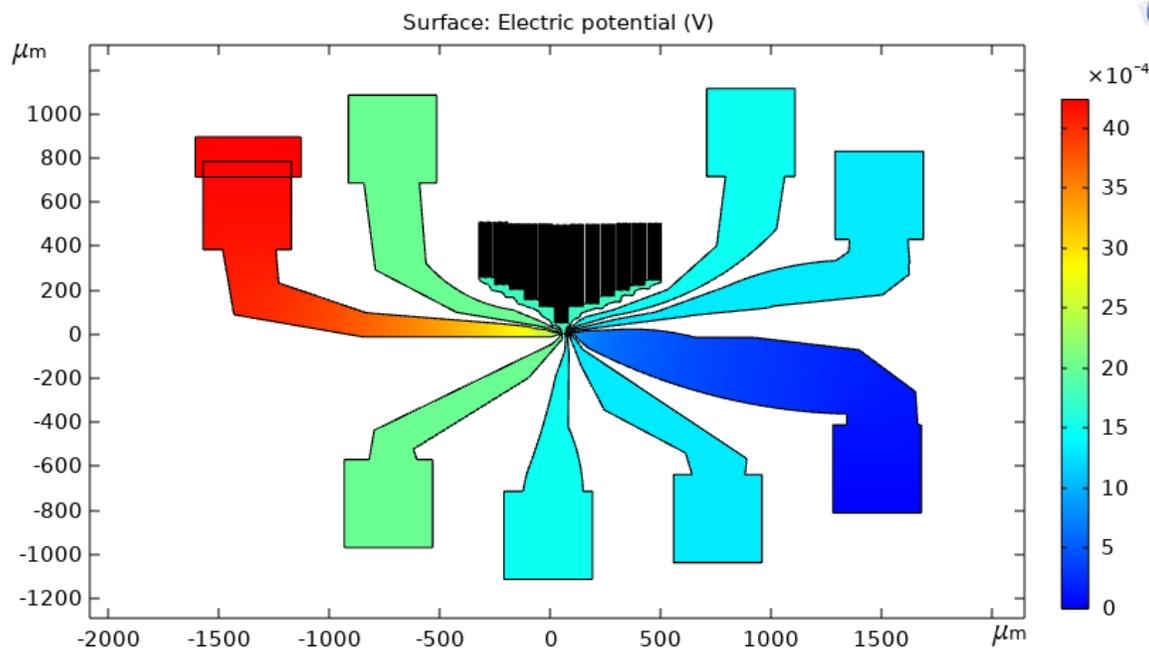
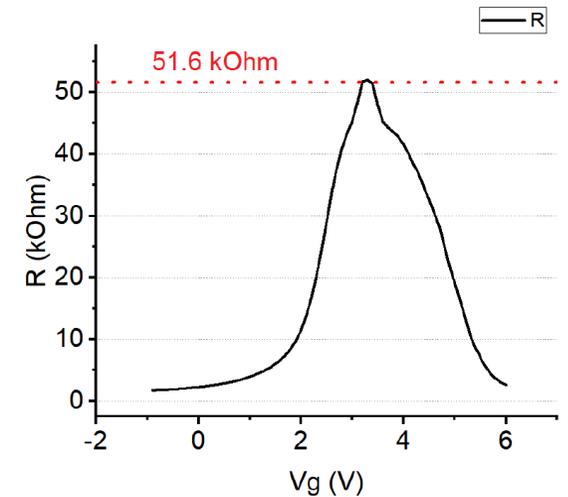


Рис. 6.1. АСМ-снимок профиля образца КРТ160203 после травления. (а) область у контактов, (б) область у рогов.

4. Систематичность представления данных эксперимента вызывает некоторые вопросы. В тексте ВКР упоминается величина сопротивления, измеренного по двухточечной схеме при комнатной температуре (стр.44, 51), при этом аналогичных данных для низкой температуры не приводится. Указанное же значение сопротивления в 100-200 кОм вызывает вопрос о вкладе в эту величину отдельно омических контактов в месте пайки индия и подводящих частей двумерного газа. Какое сопротивление можно было бы ожидать для подводящих частей двумерного газа исходя из его сопротивления на квадрат?



$$R_{2point} = 60 \text{ k}\Omega$$

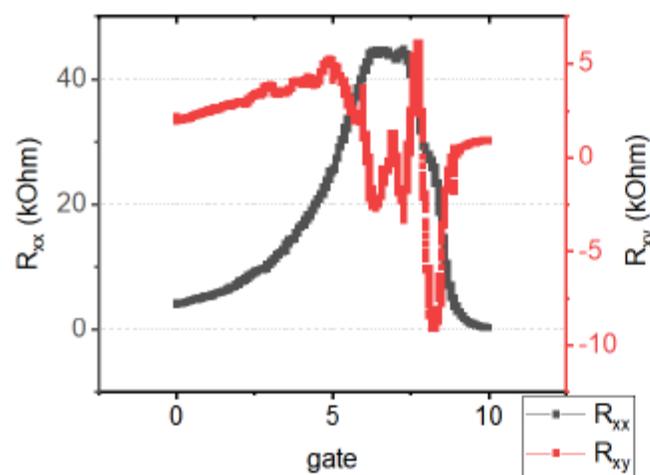
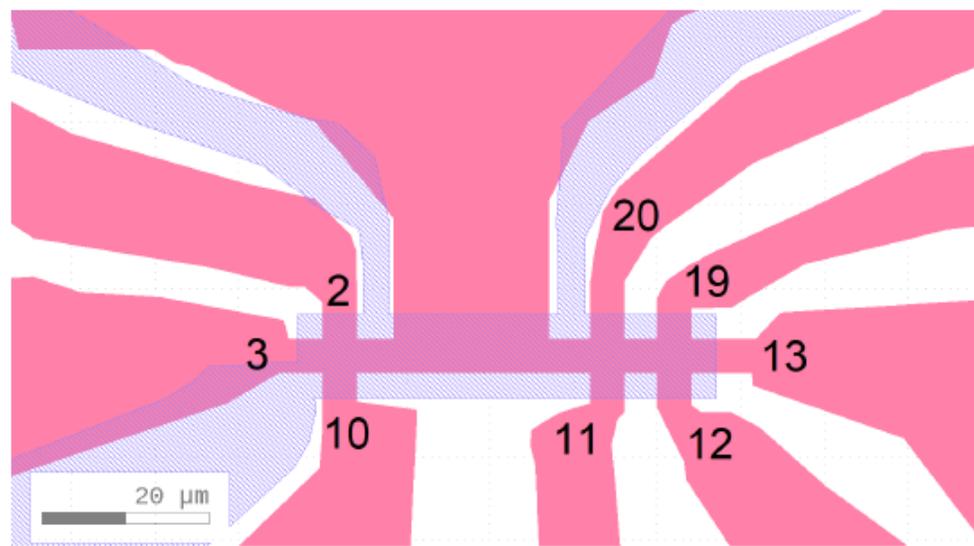


$\rho(V_g = 0) = 1.7 \text{ k}\Omega/\text{square}$
 (хорошо травленный образец).
 в недотраве в 2 раза больше

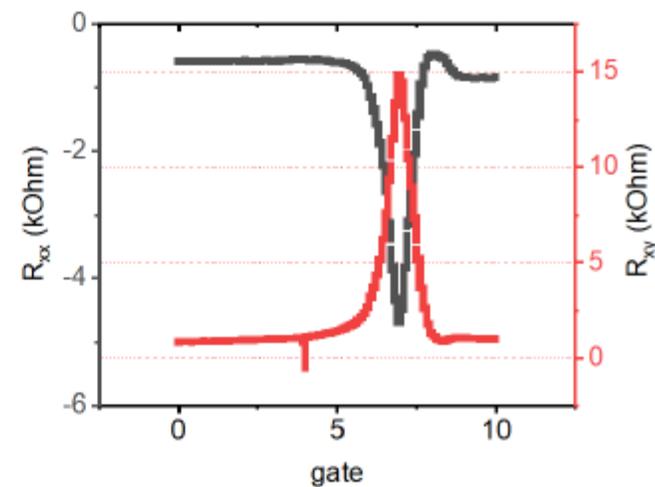
На стр.52 приводится список значений сопротивлений, измеренных по четырехточечной схеме, снова при комнатной температуре. Аналогичные же данные для низкой температуры полным образом не представлены.

6.1.4. Локальные измерения при $T = 3\text{K}$

Локальные измерения при низкой температуре и нулевом магнитном поле показали сопротивления на контактах $\{11, 12\}$ и $\{20, 11\}$ изображённые на рис. 6.4 (a)



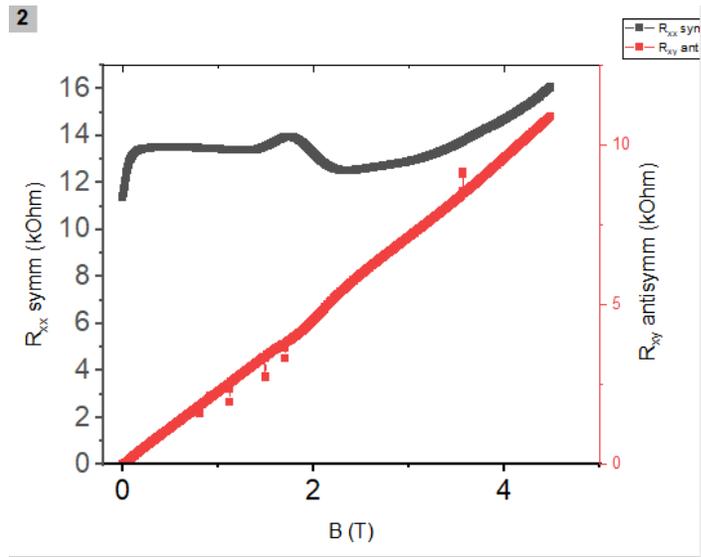
(a)



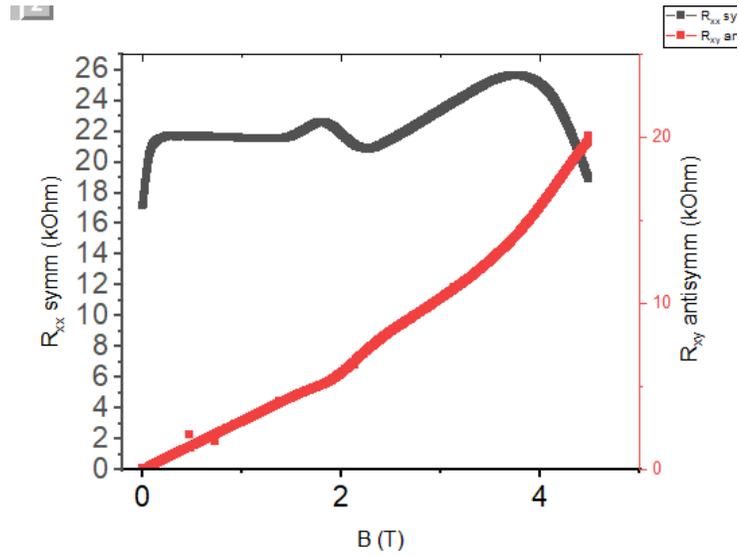
(b)

Рис. 6.4. (в цвете) (a) Локальные сопротивления структуры, здесь $R_{xx} = R_{3\ 13,11\ 12}$, $R_{xy} = R_{3\ 13,20\ 11}$. (b) Нелокальное сопротивление, $R_{xx} = R_{3\ 10,11\ 12}$, $R_{xy} = R_{3\ 10,20\ 11}$. Отрицательное сопротивление соответствует отрицательному падению напряжения между контактами. Температура 3К, магнитного поля нет.

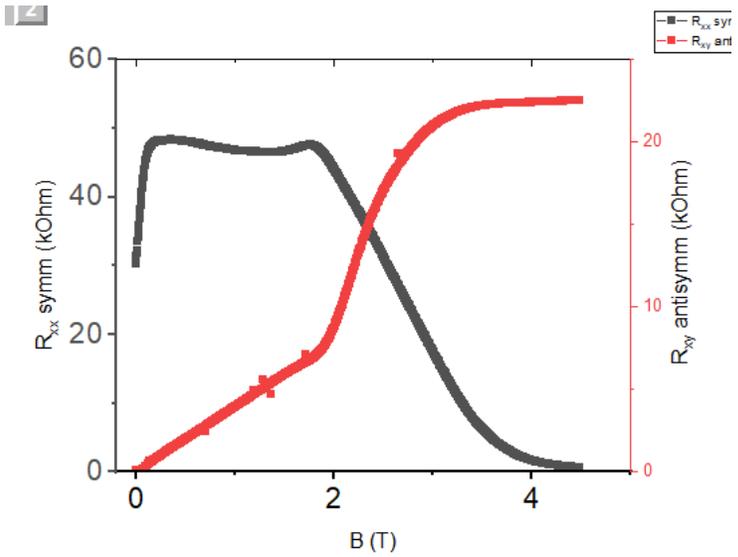
На рис.6.5 приводятся симметризованные и антисимметризованные кривые для продольного и холловского сопротивления. В тексте опущено обсуждение того, зачем нужна (анти-) симметризация. Кривая холловского сопротивления приведена лишь для одного значения затворного напряжения, в то время как концентрация носителей извлечена из семи кривых, которые следовало продемонстрировать.



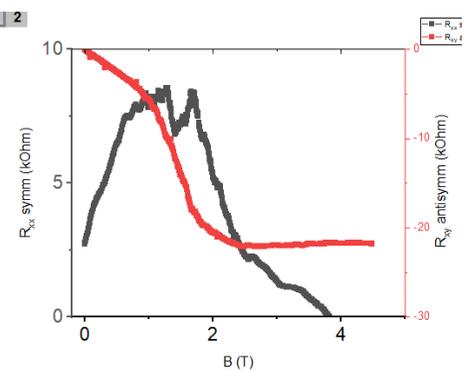
$V_g = -2.5$ V



$V_g = 0$ V

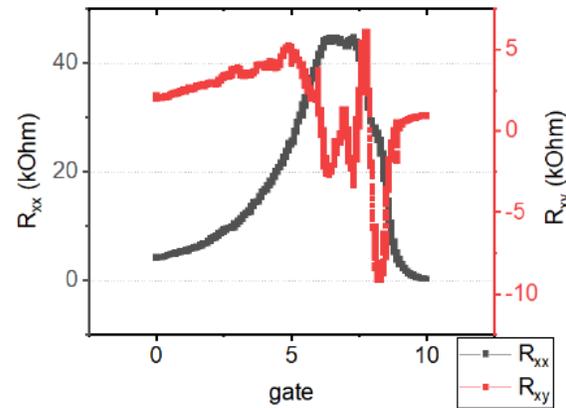
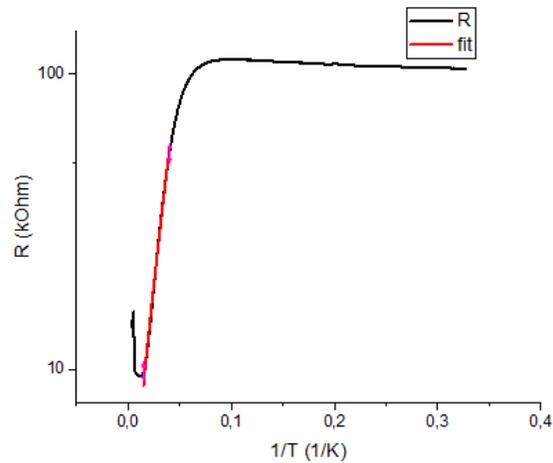


$V_g = +2.5$ V

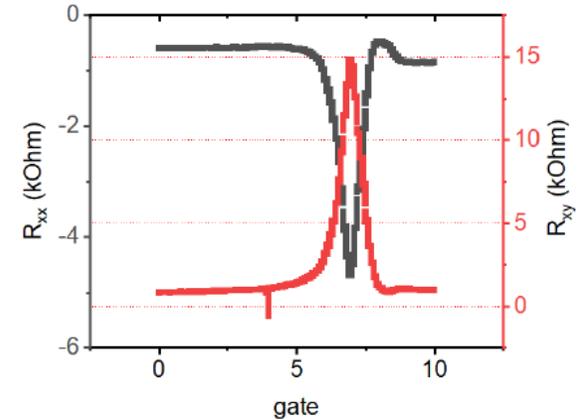


$V_g = 12.5$ V

Почему демонстрируемое на рис.6.7 значение продольного сопротивления при низких температурах не соответствует значению сопротивления в точке зарядовой нейтральности на рис.6.4? Почему отсутствует фит на рис.6.7? Что означает и почему справедливо утверждение «На величину таким образом вычисленной щели проводимость травленной области не сказывается»? (в частности, эта область вероятно не покрыта затворным электродом, а потому загнать ее в точку нейтральности невозможно)



(a)



(b)

Рис. 6.4. (в цвете) (a) Локальные сопротивления структуры, здесь $R_{xx} = R_{3,13,11,12}$, $R_{xy} = R_{3,13,20,11}$. (b) Нелокальное сопротивление, $R_{xx} = R_{3,10,11,12}$,

Рис. 6.7. (в цвете) температурная зависимость локального сопротивления в нулевом магнитном поле в точке зарядовой нейтральности $R(T) = R_{3,13,11,12}$

Опечатка. На самом деле всё сходится