

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 27

*Раздел:* Физика наноструктур и наноэлектроника

*Направление:* Разработка методов вычислительного моделирования в наноэлектронике + Физические основы технологий квантовых наноструктур и наноэлектроники.

**Проект № 31: Интроскопия полупроводниковых  
одноэлектронных и квантовых наноустройств**

*Организация Исполнитель:* Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

*Координаторы проекта:* к.ф.-м.н. Ткаченко Ольга Александровна

e-mail: [otkach@isp.nsc.ru](mailto:otkach@isp.nsc.ru)

д.ф.-м.н., чл.-к. РАН Латышев А. В.

тел. (383) 333 10 80

e-mail: [latyshev@thermo.isp.nsc.ru](mailto:latyshev@thermo.isp.nsc.ru)

*Участники проекта:* к.ф.-м.н. Ткаченко В. А.; д.ф.-м.н. Квон Зе Дон;  
к.ф.-м.н. Щеглов Д.В.; к.ф.-м.н. Торопов А.И.; д.ф.-м.н., ак. Асеев А.Л.

***Цель работы:***

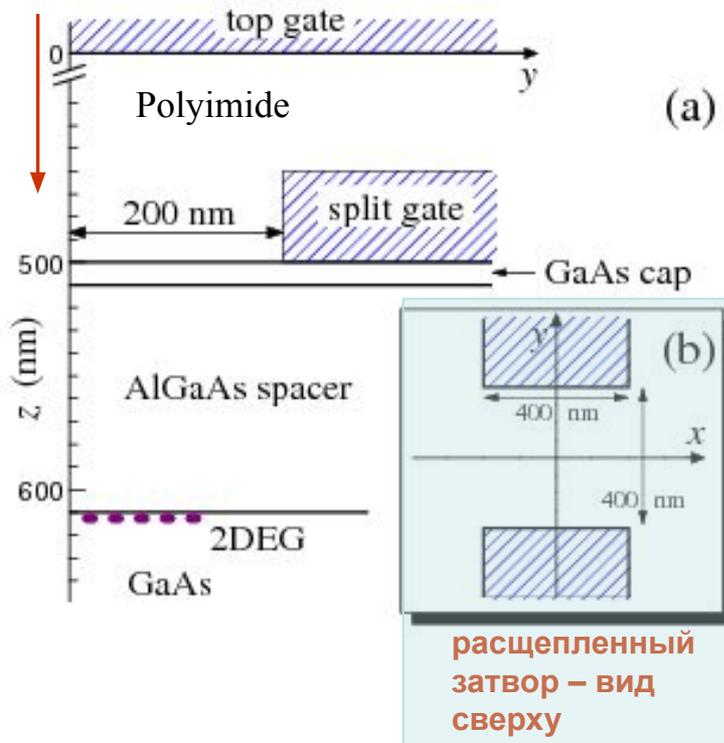
Вычислительное прогнозирование электронно-транспортных свойств наноструктур на основе базовых теорий, данных структурной диагностики и результатов низкотемпературных исследований сопротивления образцов.

***Суть проблемы и примеры ее решения на следующих 5 слайдах***

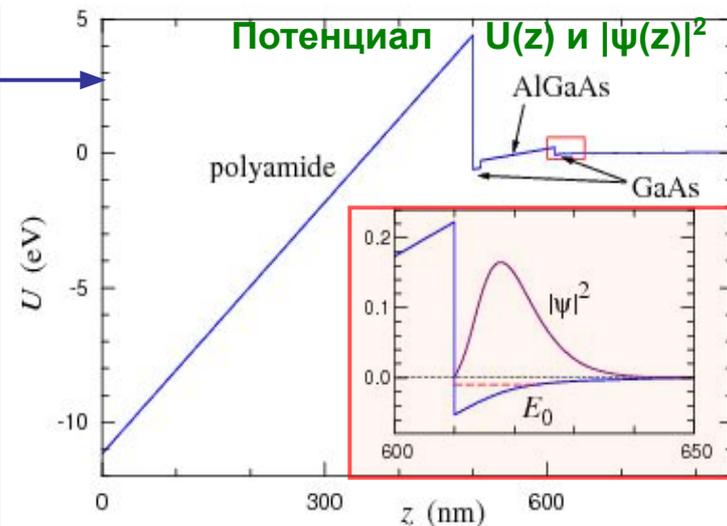
Смысл вычислительной интроскопии в нахождении геометрии и квантовых свойств 2D электронной наносистемы, формируемой в глубине устройства и определяющей его поведение при низких температурах. **Исходные структурные и электрофизические данные** получаются непосредственно из первых рук экспериментаторов и технологов.

## Интроскопия квантового точечного контакта. Часть 1. Расчет для области однородного 2D электронного газа (2DEG).

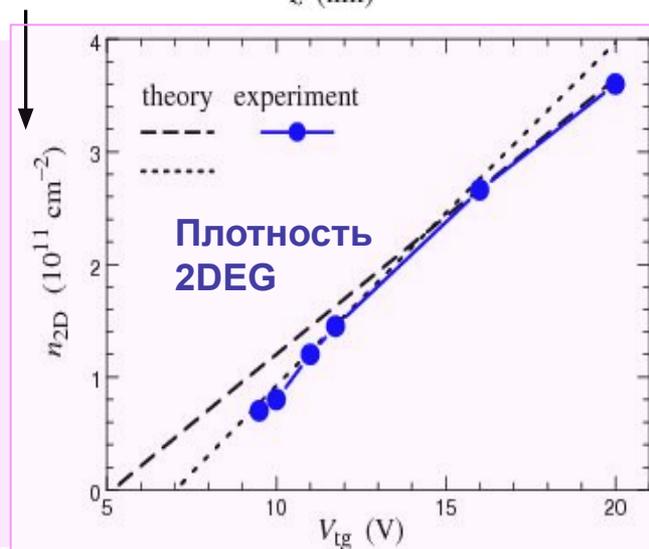
1. Система без легирования, но с двумя затворами-сплошным (top gate) выше слоя полиимида и расщепленным затвором на поверхности полупроводника



2. Расчет для точек  $(x,y)$  вдали от расщепл. затвора. Случай  $V_{tg} = 11$  В.  $E_0$ -уровень размерного квантования по  $z$ . Состояния от  $E_0$  до 0 заняты электронами (2DEG).

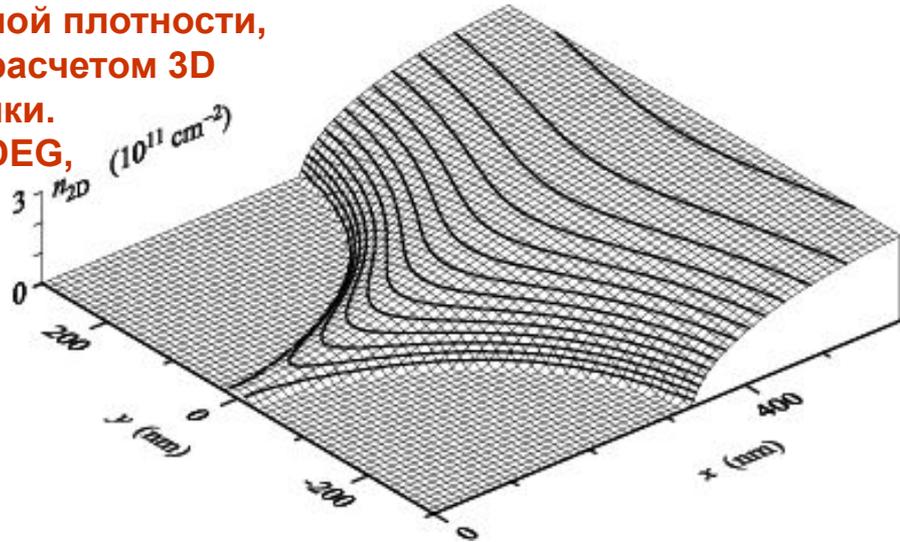


3. Сравнение расчета с измерениями для двух толщин слоя полиимида: номинальной (500 нм-пунктир) и подгоночной (630 нм-точки). При напряжении на верхнем затворе выше критического (5, либо 7 В) возникает индуцированный 2DEG

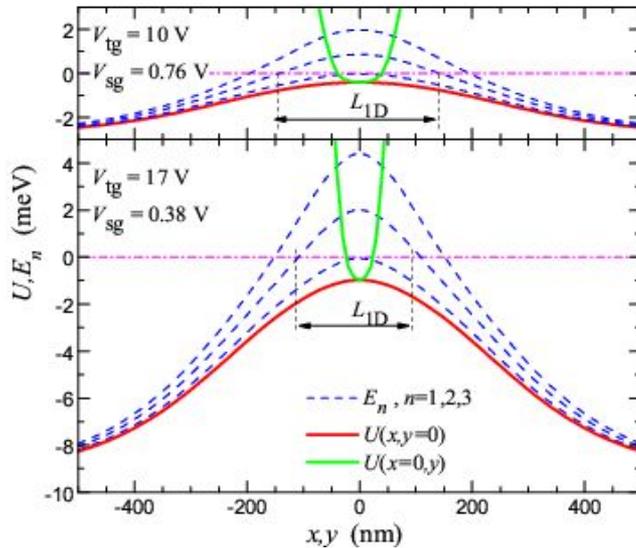


# Интроскопия квантового точечного контакта. Часть 2. Область под расщепленным затвором и квантование кондактанса. Проверка соответствия теории эксперименту.

1. Пример распределения 2D электронной плотности, найденного расчетом 3D электростатики. Сужение в 2DEG, половинка.



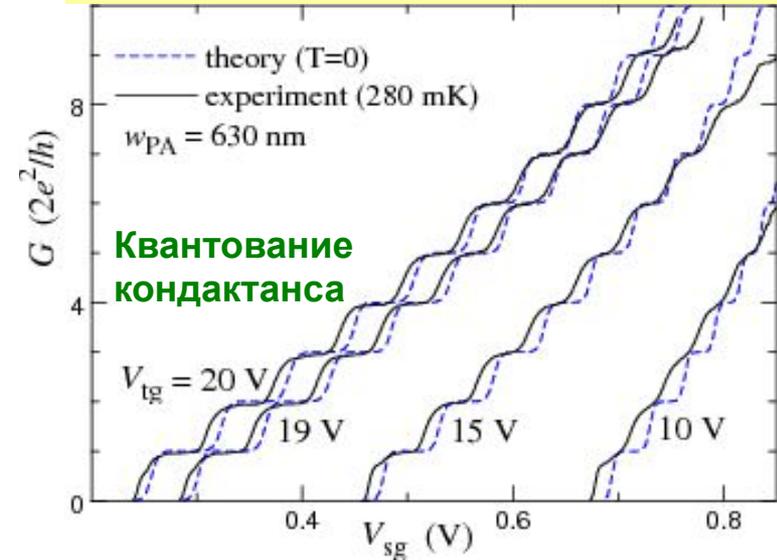
2. Эффективный потенциал вдоль и поперек сужения—сплошн. линии. Спектр 1D подзон в сужении—пунктир.  $L_{1D}$ —область 1D канала.



3. Расчет коэффициента прохождения 2D электронных волн и кондактанса по формуле Ландауэра для найденного сужения в 2DEG

$$G = I/V = (2e^2/h) \cdot T(E_F, U(x,y, V_{sg}, V_{tg})).$$

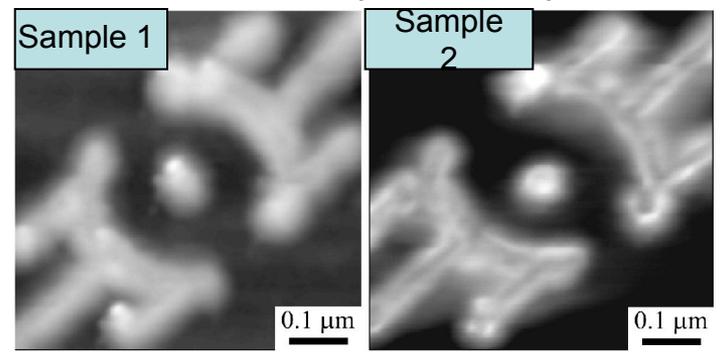
Для каждой пары  $(V_{sg}, V_{tg})$  решалась задача 3D электростатики и 2D квантового транспорта. Правильно предсказано поведение кондактанса, несмотря на принадлежность системы к мезоскопике!



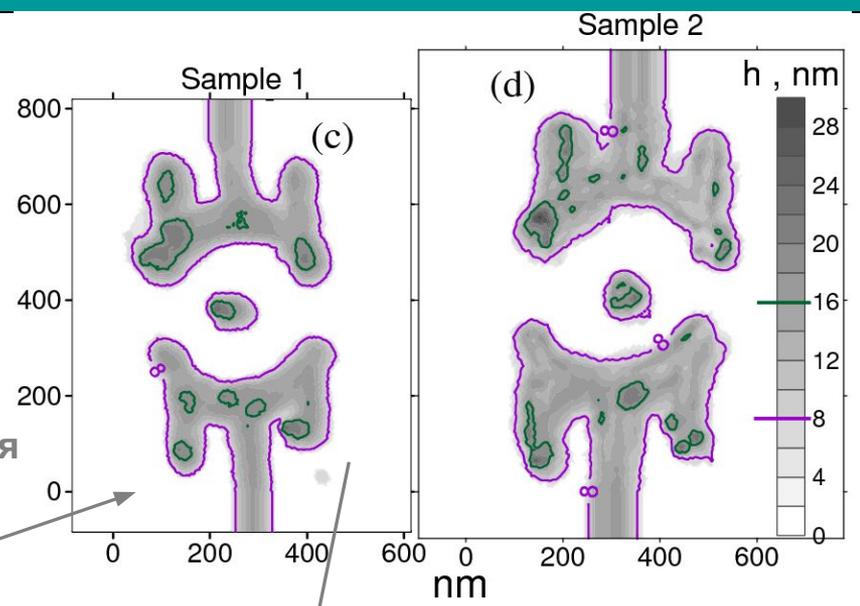
• **Неразрушающий контроль рабочих образцов атомно-силовой микроскопией** дает детальную информацию о форме поверхности образца, которая важна для интроскопии с учетом ошибок нанолитографии.

# Интроскопия электронных колец изготовленных зондом АСМ. Часть 1. Влияние допусков нанолитографии на геометрию электронной системы

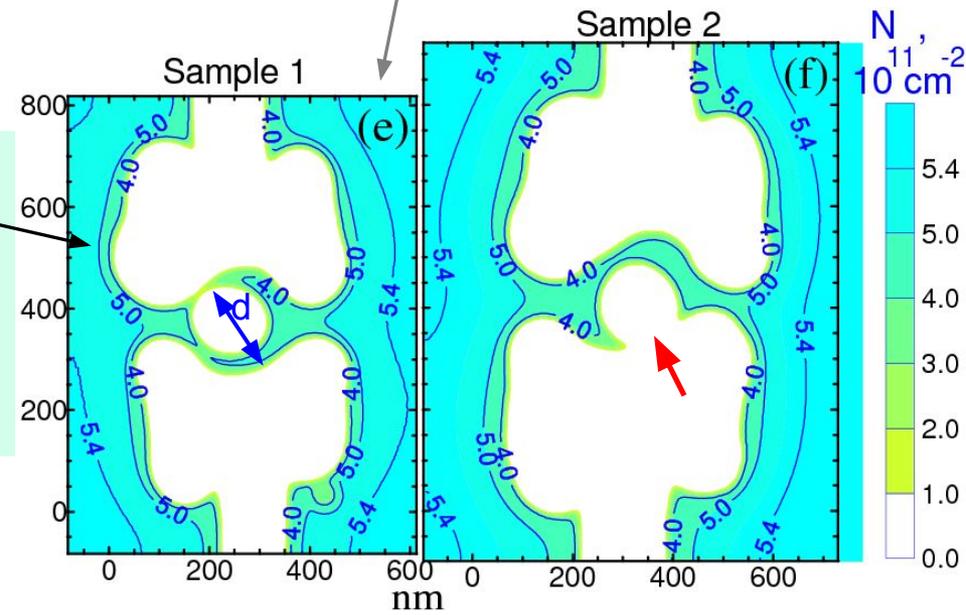
1. Изображения в АСМ высоты рельефа, сформированного локальным анодным окислением на поверхности гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Образцы сделаны по одному шаблону.



2. Найденная глубина окисления

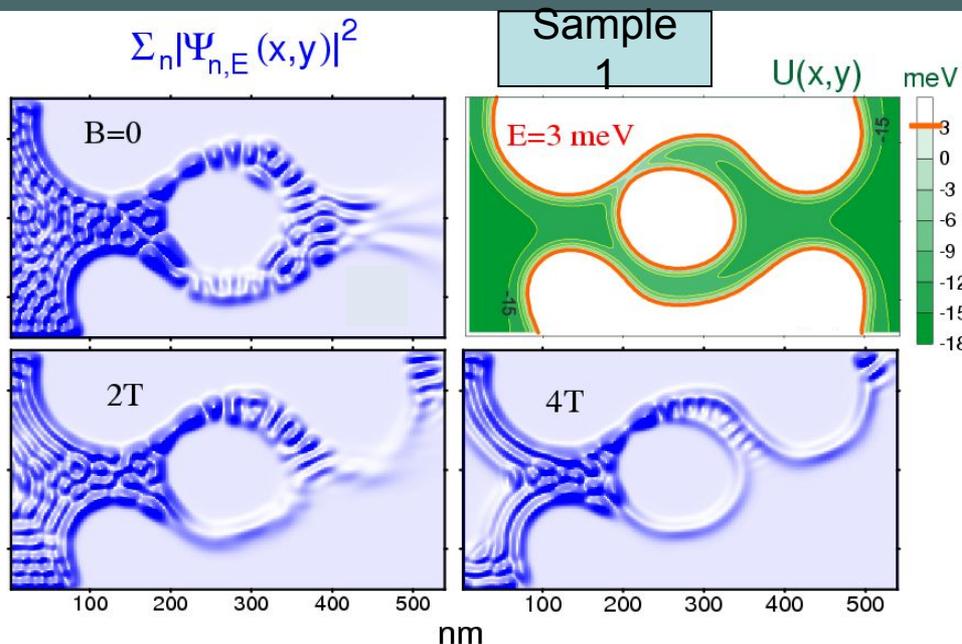


3. Расчетом 3D электростатики найдено распределение плотности  $N$  в двумерном электронном газе (на глубине 25 нм от поверхности). Обнаружены разрыв электронного кольца в случае (f) и близость к разрыву в случае (e).



В.А.Ткаченко, З.Д.Квон, Д.В. Щеглов, А.В.Латышев, А.И.Торопов, О.А.Ткаченко, Д.Г.Бакшеев, А.Л. Асеев, Письма в ЖЭТФ, (2004).

# Интроскопия электронных колец. Часть 2. Волновые функции и выключение эффекта Ааронова-Бома (АВ) при разрыве кольца

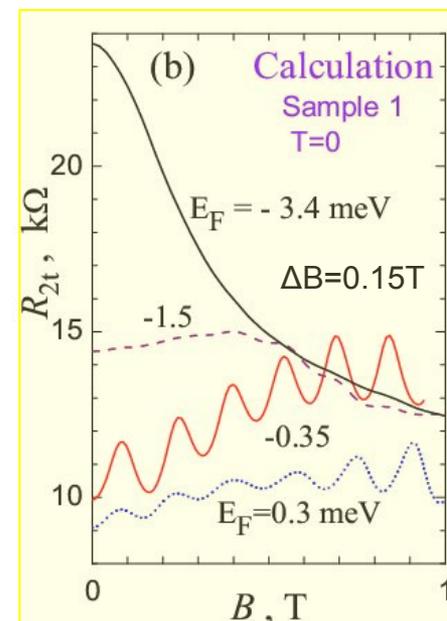
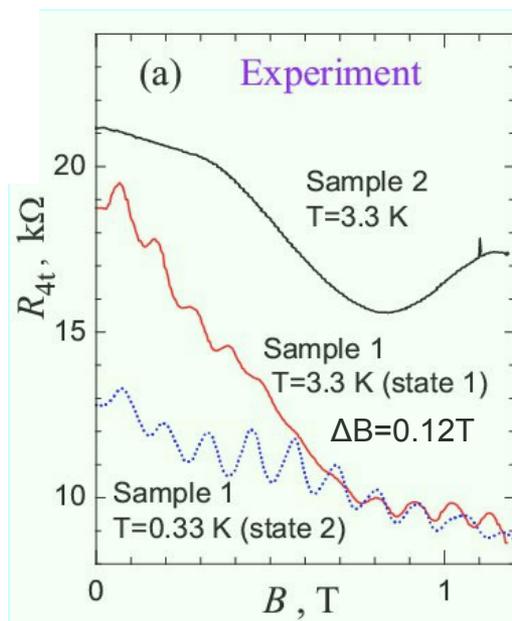


Вычисленный эффективный потенциал и результат решения задачи 2D квантового рассеяния баллистических электронов в магнитном поле от 0 до 4Т (переход в режим 1D краевых токовых состояний и квантового эффекта Холла)

(а)-Измеренное четырех-терминальное сопротивление для разорванного электронного кольца (образец 2) и для разных состояний целого кольца (образец 1).

(b)-Найденное из решения задачи 2D квантового рассеяния двух-терминальное сопротивление для образца 1. При  $E_F = -3.4$  мэВ кольцо разорвано, при  $E_F > -1$  мэВ –целое кольцо. Предсказание значений  $R$ , наличия, периода  $\Delta B$  и амплитуды осцилляций  $\Delta B$ .

• Принадлежность системы к мезоскопике исключает возможность полного согласия результатов измерений и расчета!



[state1] ссылка в Части 1; [state2] Olshanetsky E.B., Tkachenko V.A., Tkachenko O.A., Kvon Z.D., Renard V., Scheglov D.V., Latyshev A.V., Portal J.C. EMIMAG-16, Tallahassee, USA, 2004

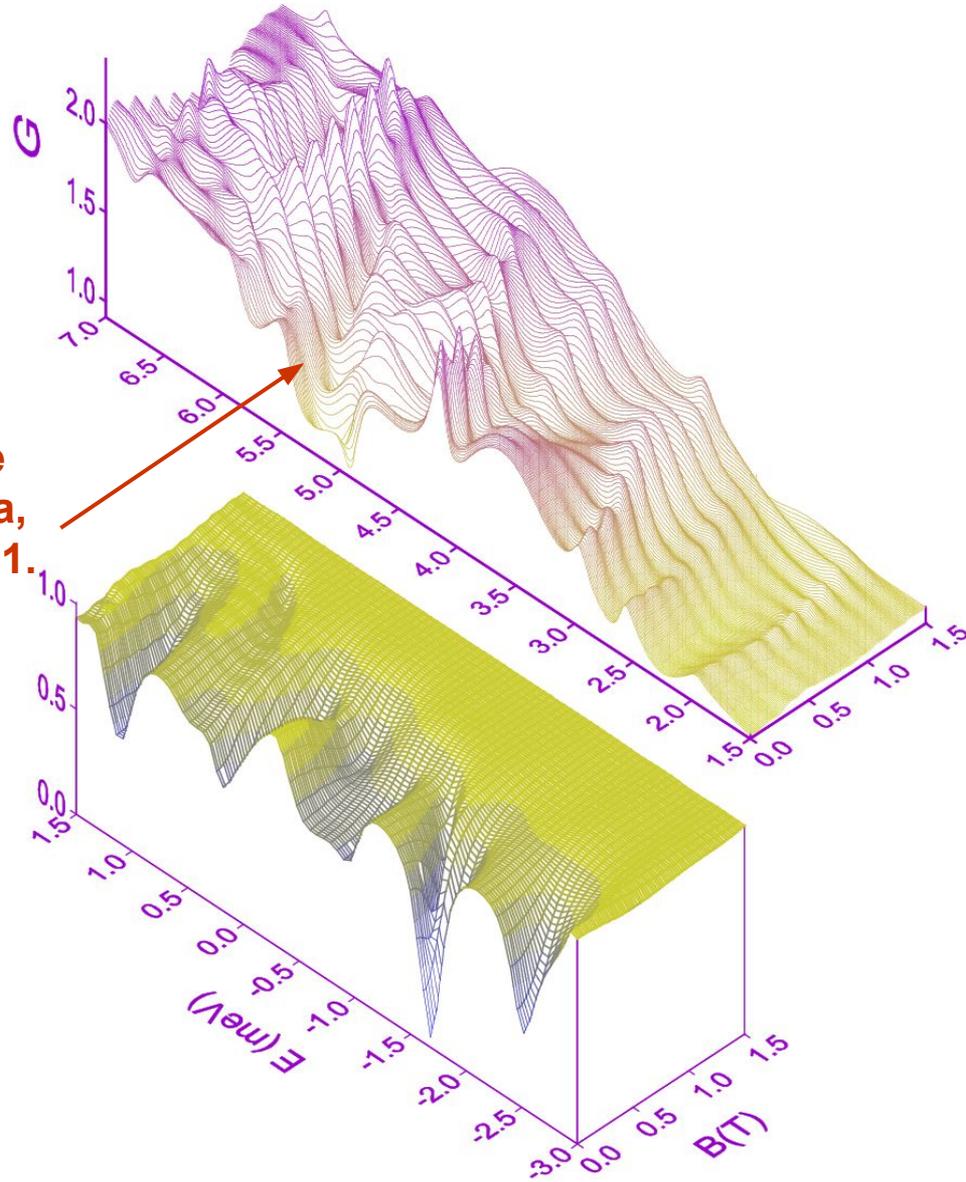
# Интроскопия электронного кольца. Часть 3. Мезоскопическое поведение осцилляций АБ

•Реалистичное прогнозирование электронно-транспортных свойств иногда требует расчетов с использованием многопроцессорных суперЭВМ.

Чтобы исследовать зависимость кондуктанса кольца от энергии электронов и магнитного поля, задача 2D квантового рассеяния (Часть.2) решалась 150 000 раз на машине Zahir суперкомпьютерного центра IDRIS (France, <http://www.idris.fr>).

**Обнаружено сложное мезоскопическое поведение осцилляций Ааронова-Бома, обусловленное геометрией образца №1.**

1024 processors, total performance 6.5 teraflops.



## **Публикации за 2006-2008, связанные с проектом**

1. V.T. Renard, O.A.Tkachenko, V.A.Tkachenko, T.Ota, N.Kumada, J.C. Portal, Y. Hirayama. Boundary-Mediated Electron-Electron Interactions in Quantum Point Contacts. Phys. Rev. Lett. 100, 186801 (2008). <http://www.natureasia.com/asia-materials/highlight.php?id=130>
2. Kvon, Z.D., Kozlov, D.A., Olshanetsky, E.B., Plotnikov, A.E., Latyshev, A.V., Portal, J.C. Ultra-high Aharonov-Bohm oscillations harmonics in a small ring interferometer. Solid State Communications. 147, 230 (2008).
3. Mayorov A. S., Kvon Z. D., Savchenko A. K., Scheglov D. V., Latyshev, A.V. Coulomb blockade in an open small ring with strong backscattering. Physica E, 40, 1121 (2008).
4. Козлов Д.А., Квон З.Д., Плотников А.Е., Щеглов Д.В., Латышев А.В. Кондактанс коротких квантовых проволок с резкими границами. Письма в ЖЭТФ, 86, 752 (2007)
5. O.A.Tkachenko, V.A.Tkachenko, V.T.Renard, J.-C.Portal, A.L. Aseev. Scanning Gate microscopy/ spectroscopy of quantum channel with constriction: tip voltage controlled electron wave direction in Y-junction. 15th Intl. Symp. Nanostructures: Physics and Technology (Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007), Proceedings (Ioffe Institute, St. Petersburg) p. 297.
6. З. Д. Квон, Е. А. Галактионов, В. А. Сабликов, А. К. Савченко, Д. А. Щеглов, А. В. Латышев. Новый режим резонансов обратного рассеяния в квантовом интерферометре малых размеров. Письма в ЖЭТФ, 83, 530 (2006).
7. V.A.Tkachenko, D.V.Sheglov, Z.D.Kvon, E.B.Olshanetsky, A.V.Latyshev, A.I.Toropov, O.A.Tkachenko, J.C.Portal, A.L.Aseev. Smallest Aharonov-Bohm interferometer, fabricated by local anodic oxidation. Proc. 14th Int. Symp. Nanostructures Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June 26-30, p.250 (2006).
8. З.Д.Квон, А.А.Быков, А.И.Торопов, А.В.Латышев, В.А.Ткаченко, О.А.Ткаченко, Ж.К.Портал, В.А.Гайслер, А.Л.Асеев. Квантовый транспорт и однофотонное излучение в микро- и наноструктурах на основе эпитаксиальных слоев соединений АЗВ5. Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». Материалы конференции. Томск, 3-5 октября 2006. с.38-43.
9. Атомная структура полупроводниковых систем. Отв. ред. ак. А.Л.Асеев, Глава IV. А.А.Быков, З. Д.Квон, Е.Б.Ольшанецкий, А.Л.Асеев, М.Р.Бакланов, Л.В.Литвин, Ю.В.Настаушев, В.Г.Мансуров, В.П.Мигаль, С.П.Мощенко, В.А.Ткаченко, В.А.Колосанов, К.П.Черков, О.А.Ткаченко, А.В.Латышев, Т.А.Гаврилова, О.Эстибаль, Ж.-К.Портал. Квантовые и одноэлектронные эффекты в полупроводниковых структурах, Новосибирск, Издательство СО РАН, 2006, с.128-183; §25. Д.В.Щеглов, Е.Е.Родякина, А.В.Латышев, А.Л.Асеев. Новые возможности нанолитографии зондом атомно-силового микроскопа. С.264-280.

## ***Результаты, ожидаемые в 2009 г.***

- Создание системы сбора и накопления исходных данных для вычислительной интроскопии изучаемых образцов.
- Создание программы для моделирования перколяций в большой решетке антиточек.
- Адаптация имеющихся алгоритмов расчетов транспорта к многопроцессорной машине Сибирского суперкомпьютерного центра (НКС-160).
- Завершение исследования малой трехконтактной квантовой точки. Опубликование статей.