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 е-mail: <u>otkach@isp.nsc.ru</u> д.ф.-м.н., чл.-к. РАН Латышев А. В. тел. (383) 333 10 80 е-mail: <u>latyshev@thermo.isp.nsc.ru</u> Участники проекта: <u>к.ф.-м.н.</u> Ткаченко В. А.; д.ф.-м.н. Квон Зе Дон; <u>к.ф.-м.н. Щеглов Д.В.; к.ф.-м.н.</u> 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 <u>в глубине</u> 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 <u>без легирования</u>, но с двумя затворами-сплошным (top gate) выше слоя полиимида и расщепленным затвором на поверхности полупроводника



2. Расчет для точек (х,у) вдали от расщепл. затвора. Случай V₁ =11 В. E₀-уровень размерного квантования по z. Состояния от E₀ до 0 заняты электронами (2DEG).

U (eV)

-5

-10

3. Сравнение расчета с измерениями

для двух толщин слоя полиимида: номинальной (500 нм-пунктир) и подгоночной (630 нмточки). 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 1. Пример распределения теории эксперименту.



Tkachenko O.A., Tkachenko V.A., Baksheyev D.G., <u>Pyshkin K.S., Harrell R.H., Linfield E.H., Ritchie D.A., Ford C.J.B.,</u> Electrostatic potential and quantum transport in a one-dimensional channel of an induced two-dimensional electron gas. J. Appl. Phys. 89, 4993 (2001). *Cavendish Laboratory, United Kingdom*

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

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



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 (е).

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 изготовленных зондом АСМ. Часть 1. Влияние допусков нанолитографии на геометрию электронной системы



Интроскопия электронных колец. Часть2. Волновые функции и выключение эффекта Ааронова-Бома (АВ) при разрыве кольца



(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 мэB кольцо разорвано, при E_F>-1 мэB –целое кольцо. Предсказание значений R, наличия, периода ΔB и амплитуды осцилляций AB.

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

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



[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 Реалистическое прогнозирование электронно-транспортных свойств иногда требует расчетов с использованием многопроцессорных суперЭВМ.

Чтобы исследовать зависимость кондактанса кольца от энергии электронов и магнитного поля, задача 2D квантового рассеяния (Часть.2) решалась150 000 раз на машине Zahir суперкомпьютерного центра IDRIS (France, <u>http://www.idris.fr</u>).

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

0

1.0

19

60

55

50

25

0

20

35

30

25

20

1500

20

05

30,00

10

1024 processors, total performance 6.5 teraflops.



Интроскопия электронного кольца. Часть 3. Мезоскопическое поведение осцилляций АБ

Публикации за 2006-2008, связанные с проектом

- 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). <u>http://www.natureasia.com/asia-materials/highlight.php?id=130</u>
- 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)
- 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 (loffe Institute, St. Petersburg) p. 297.
- 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).
- 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).
- 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 конфкеренция «Арсенид галия и полупроводниковые соединения группы III-V». Материалы конференции. Томск, 3-5 октября 2006. с.38-43.
- 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.