

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ П.6.

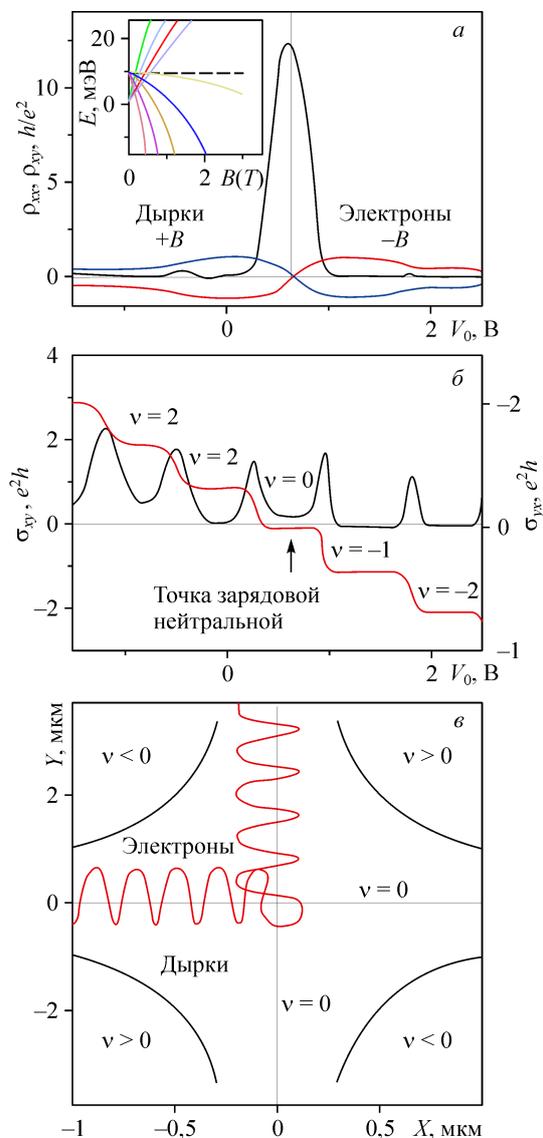
### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, В ТОМ ЧИСЛЕ КВАНТОВОЙ МАКРОФИЗИКИ, МЕЗОСКОПИКИ, ФИЗИКИ НАНОСТРУКТУР, СПИНТРОНИКИ, СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

#### Программа П.6.1. Физика полупроводниковых наноструктур и квантовые эффекты в полупроводниках (координатор акад. А. Л. Асеев)

В Институте физики полупроводников им. А. А. Ржанова обнаружен эффект подавления сильной локализации в двумерной электронно-дырочной системе в точке зарядовой нейтральности, т. е. в точке равенства концентраций электронов и дырок. Исследования в принятых условиях режима квантового эффекта Холла (КЭХ) показали (рис. 1), что в сильном магнитном поле двухкомпонентная электронно-дырочная плазма обладает принципиально иными топологическими свойствами, чем обычная однокомпонентная (электронная или дырочная) плазма. Предполагается, что именно эти свойства приводят к возникновению бесконечного множества делокализованных проводящих токовых состояний и подавлению локализации.

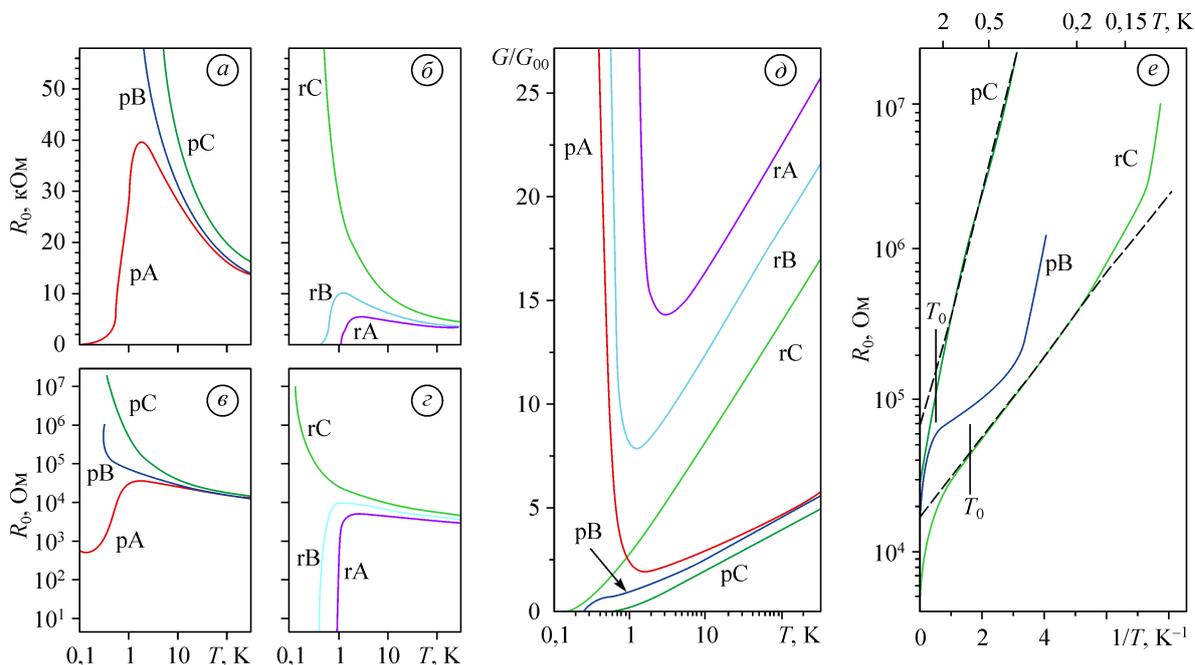
В этом же Институте проведено сравнительное экспериментальное исследование перехода сверхпроводник — изолятор в сплошных и наноперфорированных пленках нитрида титана (квадратная решетка отверстий с периодом 200 нм и диаметром 120 нм). Показано, что увеличение сопротивления образцов при понижении температуры обусловлено вкладом в проводимость эффектов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации. Причем наклон зависимостей для каждой серии не изменяется и согласуется с геометрическим фактором. Это доказывает, что наноструктурирование пленок не изменяет микроскопический беспорядок в системе. На рис. 2 представлены результаты исследования температурных зависимостей сопротивления в нулевом магнитном поле сплошных и перфорированных пленок.

Перфорирование пленок существенно сдвигает сам переход сверхпроводник—изолятор и все характеристические температуры, в частности, температуру сверхпроводящего перехода. После первого краткого травления сплошная пленка (гВ) все еще демонстрирует пере-



**Рис. 1.** Квантовый эффект Холла в двумерной электронно-дырочной системе.

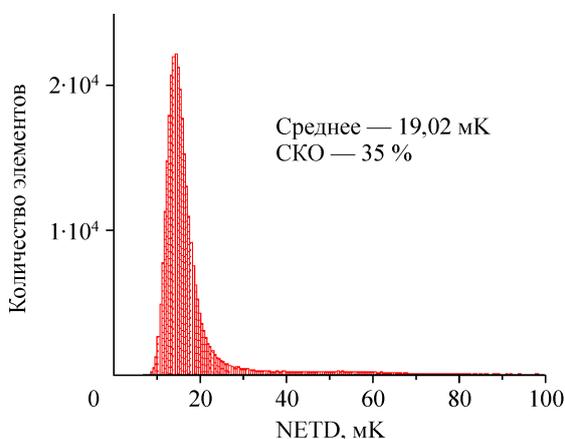
Зависимость диагональной и холловской компонент тензора сопротивления (а) и проводимости (б) от затворного напряжения в магнитном поле  $B = 2,8$  Тл. Топология токовых состояний двумерного полуметалла в режиме КЭХ в точке зарядовой нейтральности (в).



**Рис. 2.** Температурные зависимости сопротивления на квадрат перфорированных (рА, рВ, рС) (а, в) и соответствующих им сплошных пленок TiN (rA, rB, rC) (б, г), демонстрирующие переход сверхпроводник—изолятор. а, б — сопротивление приведено в линейном масштабе, в, г — в логарифмическом. Масштаб попарно совпадает между а, б и в, г. Те же зависимости, но в виде кондуктанса  $G/G_{00} = 2\pi^2\hbar/(e^2R)$ , показывающие логарифмическую температурную зависимость, обусловленную эффектами слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия (д). Сопротивление как функция  $1/T$  для несверхпроводящих образцов (е). Штриховые линии отвечают зависимости  $R = R_0 \exp(T_0/T)$  с параметрами  $T = 0,63$  и  $1,9$  К,  $R_0 = 16,6$  и  $55,6$  кОм для образцов rC и pC соответственно. Данные  $T_0$  отмечены вертикальными штрихами, показывающими, что  $T_0$  определены в диапазоне  $T < T_0$ .

ход в сверхпроводящее состояние, в то же время соответствующая ей перфорированная пленка (рВ) оказывается на диэлектрической стороне перехода сверхпроводник — изолятор. После второго травления и сплошная пленка (rC), и перфорированная (pC) оказываются диэлектрическими.

С использованием полученных фундаментальных результатов (см. выше) в этом же Институте разработана технология, позволяющая создавать методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из кремния диаметром до 102,4 мм кристаллические слои кадмий—ртуть—теллур (КРТ) дырочного типа



**Рис. 3.** Гистограмма разности температур, эквивалентной шуму фотоприемника  $640 \times 512$  элементов, и пример теплового изображения, полученного с его помощью в составе макета тепловизионного канала.

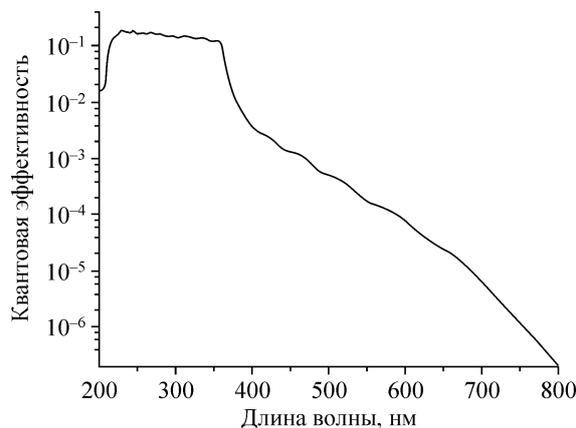
проводимости приборного качества. На основе данной технологии впервые в России разработаны и изготовлены полноформатные матричные фотоприемные модули в монолитном исполнении со схемой считывания на кремниевой части платины. Фотоприемники обладают повышенной стойкостью к термоциклированию в интервале температур 77—300 К. Разработанные фотоприемные модули позволяют получать изображение телевизионного стандарта без использования систем механического сканирования (рис. 3).

В этом же Институте разработан метод выращивания из газовой фазы графеновых слоев площадью до 150 см<sup>2</sup>. Были выполне-

ны исследования процессов роста от зарождения ромбовидных островков до формирования сплошной монослойной или двухслойной пленки графена при температурах роста от 500 до 950 °С на различных структурах, содержащих никелевые пленки толщиной от 10 до 100 нм. Диагностика получаемых графеновых слоев выполнена с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света и атомно-силовой микроскопии. Полученные результаты открывают возможность массового изготовления разработанных и запатентованных графеновых приборов и материалов. Среди них оригинальные графеновые полевые эмиттеры, нанодвигатели, газовый сенсор и метаматериал.

#### **Программа II.6.2. Физика твердотельных устройств микро- и нанoeлектроники (координатор член-корр. РАН И. Г. Неизвестный)**

В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова разработано новое поколение полупрозрачных УФ-фотокатодов с эффективным отрицательным электронным средством (ОЭС) на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlN/p-GaN(Cs, O). Спектр квантового выхода (рис. 4) с резким порогом, соответствующим ширине запрещенной зоны GaN, указывает на наличие на поверхности фотокатода состояния ОЭС. Максимальное значение квантовой эффективности составляет 0,18 при длине волны излучения 230 нм. Сравнение достигнутых результатов с известными из литературы свидетельствует о том, что уровень отечественных технологий в данной области соответствует лучшему зарубежному уровню.



**Рис. 4.** Спектр квантовой эффективности р-GaN(Cs, O) фотокатода.

#### **Программа II.6.3. Комплексная нанодиагностика систем пониженной размерности, нанолитография и нанометрология (координатор член-корр. РАН А. В. Латышев)**

В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии исследована структура и морфология пленок GaAs толщиной три монослоя, выращенных методом МЛЭ на подложках GaP(001) при температуре 560 °С и заросенных сверху слоем фосфида галлия, толщиной 50 нм. По данным ВРЭМ, пленка GaAs является островковой (рис. 5, а).

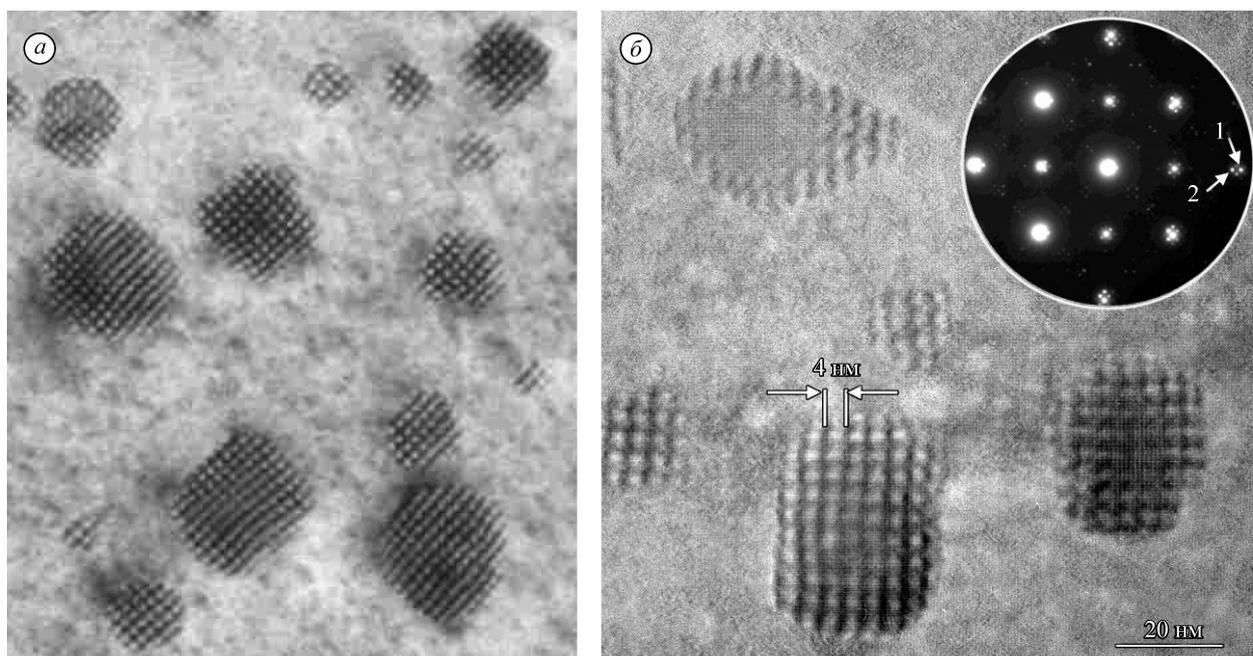
Размер островков варьируется в диапазоне 10—50 нм, средний размер составляет ~20 нм. Параметр кристаллической решетки всех островков, независимо от размера, соответствует параметру решетки объемного GaAs. Об этом свидетельствует наличие муарового узора на ВРЭМ-изображениях всех островков и дифракционных максимумов от GaP и GaAs на картинах микродифракции (рис. 5, б). Островко-

вая пленка GaAs является полностью релаксированной и содержит, по-видимому, в границе раздела ортогональную сетку краевых дислокаций несоответствия. По данным исследования фотолюминесценции этих объектов, эти дислокации не являются центрами безызлучательной рекомбинации.

В этом же Институте разработан комплекс универсальных прикладных программ для численного восстановления экспериментально невидимых характеристик полупроводниковых одноэлектронных и квантовых наноструктур, а также квантовых и одноэлектронных явлений, происходящих внутри устройств.

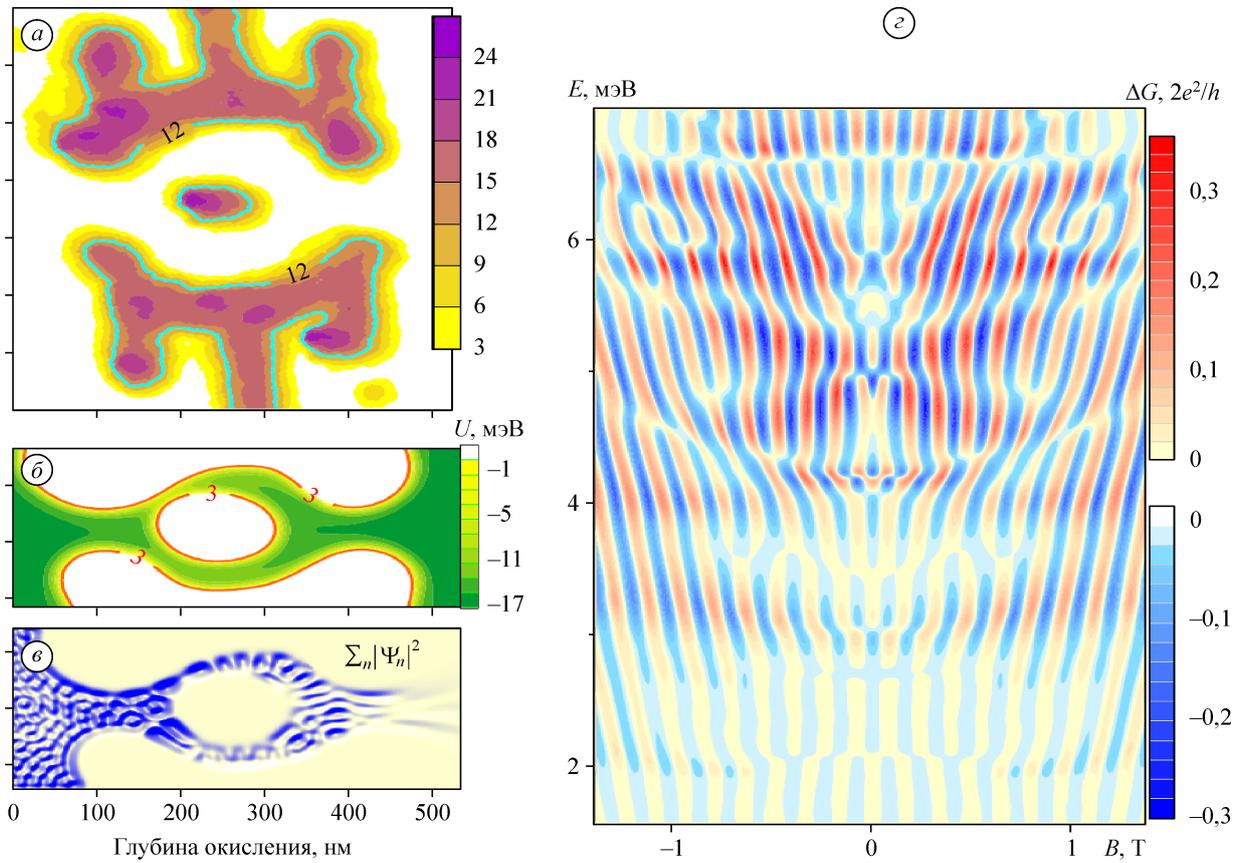
Разработка иллюстрируется на примере кольцевого интерферометра, созданного локаль-

ным анодным окислением (рис. 6): *a* — карта глубины окисления структуры GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом (ДЭГ), найденная по данным атомно-силовой микроскопии (видны несовершенства изготовления); *b* — удерживающий потенциал в плоскости ДЭГ (заметна асимметрия); *в* — плотность вероятности для электронов, падающих слева с указанной энергией  $E = 3$  мэВ при  $B = 0$  (видна интерференция); *г* — вычисленная на супер-ЭВМ карта осцилляций кондактанса интерферометра с изменением  $E$  и магнитного поля  $B$  (виден интересный физический эффект — дрейф фазы и ветвление осцилляций Ааронова—Бома).



**Рис. 5.** Электронно-микроскопические изображения и картина микродифракции (на вставке к рисунку *б*) вдоль направления  $[001]$  островков GaAs в матрице GaP.

1 и 2 — рефлексы от плоскостей (400) GaP и GaAs соответственно. Период муара, наблюдаемого на изображениях островков GaAs, составляет  $\sim 4$  нм и соответствует расчетному периоду муара (3,8 нм) от наложения плоскостей (400) GaAs (межплоскостное расстояние — 0,141 нм) и (400) GaP (межплоскостное расстояние — 0,136 нм).



**Рис. 6.** Иллюстрация численного восстановления характеристик проводниковых одноэлектронных и квантовых наноструктур на примере кольцевого интерферометра.

Поясн. см. в тексте.