

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Центр Квантовых технологий

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

**Исследование характеристик одноатомных структур в широком диапазоне
температур (3-300К)**

**Циняйкин И.И., Божьев И.В., Дагесян С.А., Роголя В.А., Крупенин В.А., Шорохов В.В.,
Преснов Д.Е., Снигирев О.В.**

МГУ, Физический факультет
Москва, 2020

Цель и содержание работы.

Первые одноэлектронные устройства были созданы уже более 25 лет назад [1]. Такие устройства обладают рядом уникальных свойств [2]. Одним из перспективных направлений их применений является их использование в качестве сенсоров электрического заряда, т. к. полученные рекордно низкие значения зарядового шума одноэлектронных устройств лишь немного отличаются от квантового предела $\delta Q \sim 10^{-6} e/\sqrt{\text{Гц}}$ [3]. Кроме того, одноэлектронные элементы обладают рекордно малой потребляемой мощностью ($W \sim 10^{-9} - 10^{-12}$ Вт). В связи с этим они уже нашли своё применение в качестве вспомогательного устройства (сенсора) в ряде уникальных экспериментов [4].

Однако применение таких устройств сильно ограничено по температуре. Поначалу одноэлектронные эффекты наблюдались исключительно в диапазоне температур ниже 1 К. Рабочая температура одноэлектронных устройств прямо пропорциональна кулоновской энергии зарядовых центров, на основе которых они созданы. В свою очередь, кулоновская энергия тем выше, чем меньше размер этих зарядовых центров. В этом смысле оптимальным было бы использование предельно малых объектов как основы одноэлектронных устройств. Очевидно, что максимальной зарядовой энергией будут обладать одноэлектронные устройства на основе одиночных атомов внутри кристаллической решётки или сложной молекулы. Предельно малые размеры таких объектов и высокая энергоэффективность одноэлектронных устройств позволяют говорить о принципиальной возможности сверхплотной упаковки таких элементов ($n \sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$)

Простейшим и важнейшим элементом, в котором наблюдаются одноэлектронные эффекты, является одноэлектронный транзистор. Основными составляющими одноэлектронного транзистора являются остров (ключевой элемент устройства), надёжно отделённый туннельными переходами от стока и истока, а также электрод управления (затвор), влияющий на остров исключительно за счёт емкостной связи. В случае высокотемпературного одноэлектронного транзистора островом должен быть объект размером менее 5 нм: одиночная наночастица, молекула, молекулярный кластер или примесный атом в кристаллической решётке. Создание такого устройства является нетривиальной задачей в связи со сложностью манипулирования отдельными объектами столь малого размера, а также в связи с необходимостью очень близко подводить электроды транзистора к ним для создания туннельных переходов.

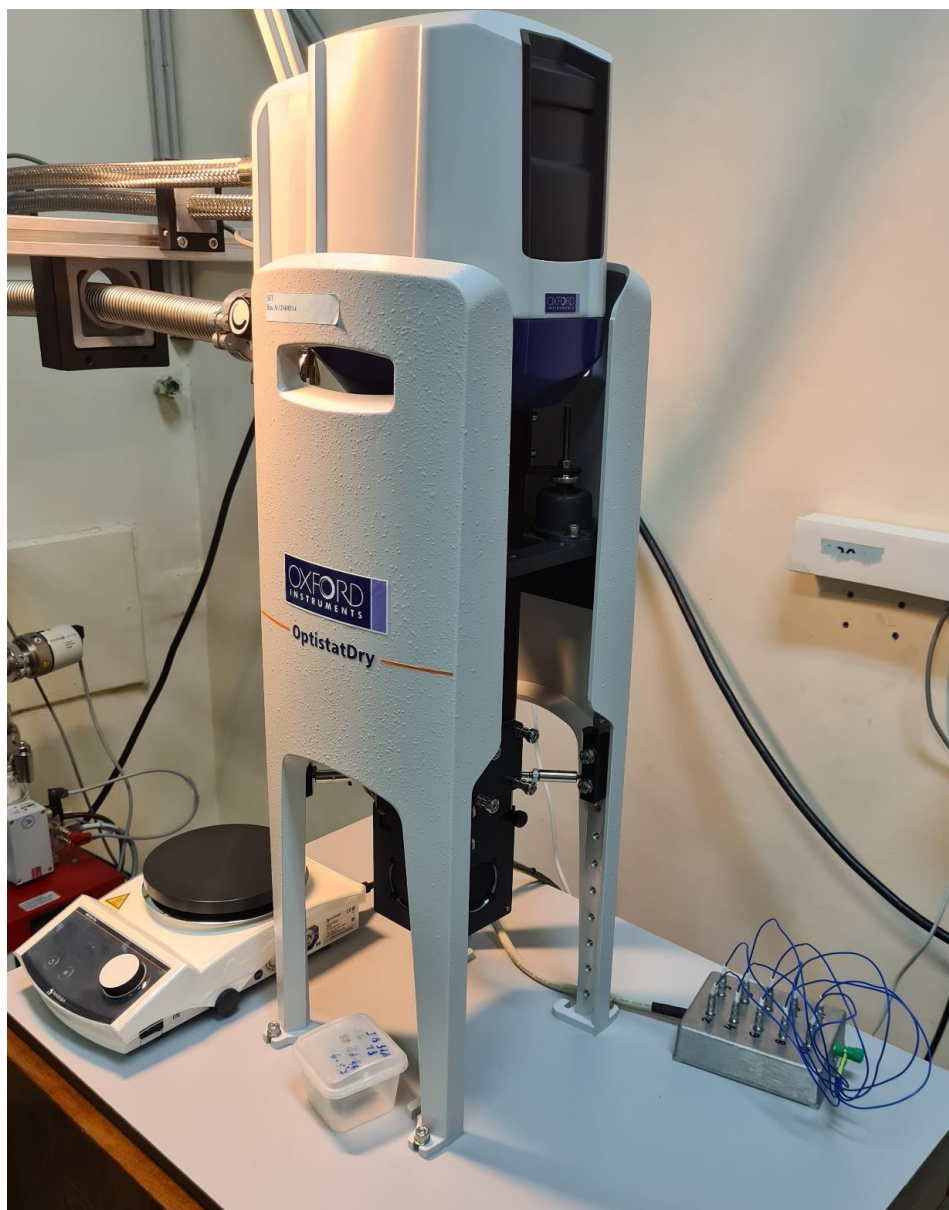
На сегодняшний день уже существует множество экспериментальных работ, где продемонстрированы различные варианты реализации одноэлектронных устройств на основе одиночных молекул или атомов [5], [6]. В них продемонстрирован ряд интересных

квантовых эффектов, наблюдающихся при низких температурах [7]. Однако применение одноэлектронных устройств для высокотемпературных приложений до сих пор остаётся нерешённой задачей, несмотря на то, что принципиальная возможность наблюдения коррелированного туннелирования электронов даже при комнатной температуре давно экспериментально показана [8].

Целью данной работы является исследование одноатомных структур (транзисторов) в широком диапазоне температур – от 3К до комнатных 300К. Изучение экспериментальных особенностей исследования одноатомного транзистора. Изучение основных методов достижения низких температур и устройства криостата, а также получение базовых навыков управления криостатом и высокоточной измерительной аппаратурой.

Используемое оборудование и приборы.

1. Гелиевый криостат замкнутого цикла Oxford OptistatDry BLV.



В криостатах такого типа для охлаждения образца до низких температур используется газообразный гелий, находящийся под высоким давлением, поступающий в криогенный охладитель от гелиевого компрессора. Охлаждение достигается за счет расширения газообразного гелия на разных ступенях охладителя. После расширения газообразный гелий при низком давлении возвращается обратно в компрессор, сжимается, охлаждается в теплообменнике и вновь поступает под высоким давлением в криогенный охладитель.

2. Измерительная система на базе приборов National Instruments



3. Блок контроля температурой Mercury iTC Oxford Instruments



4. Вакуумный откачной пост HiCube 80 Eсо в комплекте с вакуумметром PKR 251



5. Лабораторная нагревательная плитка Hei-Tec 300 °C



6. ПК с программным комплексом на базе National Instruments (LabVIEW).

Теоретическое введение.

Зарядовая энергия, туннельный контакт и кулоновская блокада

Прежде всего необходимо изучить такие понятия как *зарядовая энергия, туннельный контакт и кулоновская блокада*. Вообще говоря, как отдельная область мезоскопической физики, одноэлектроника возникла в результате исследования *туннельных контактов* сверхмалой площади. Такой *контакт* представляет собой два проводящих электрода, разделенных тонкой (~ 1 нм) диэлектрической прослойкой - туннельным барьером. Если к такому переходу приложить постоянное напряжение, то электроны будут туннелировать преимущественно в одном направлении, т.е. через переход потечет ток. Величина этого тока будет зависеть от приложенного напряжения и от параметров туннельного контакта: протяженности диэлектрического слоя, материалов диэлектрика и проводящих электродов, определяющих высоту энергетического барьера. В частности, при фиксированном напряжении на туннельном переходе V ($V \ll \Delta E/e$, ΔE - высота энергетического барьера), ток I через него пропорционален приложенному напряжению V и зависит от туннельного сопротивления перехода R .

В основе одноэлектроники лежит сосуществование двух видов переноса заряда: дискретного и непрерывного. Заряд, переносимый электронами через сечение любого проводника электрической цепи может принимать любое непрерывное значение, поскольку электроны в проводящем материале могут быть смещены на любую, сколь угодно малую величину. Если структура обычного проводника “прерывается” туннельным барьером, то перемещение электрического заряда в такой системе будет носить как непрерывный, так и дискретный характер. Непрерывный характер перемещения заряда в проводнике проявляется в его накоплении на поверхности электрода у изолирующего слоя перехода. Дискретный характер перемещения заряда связан с процессом туннелирования: при туннелировании электрона через изолирующий слой поверхностный заряд Q изменится ровно на $+e$ или на $-e$, в зависимости от направления туннелирования.

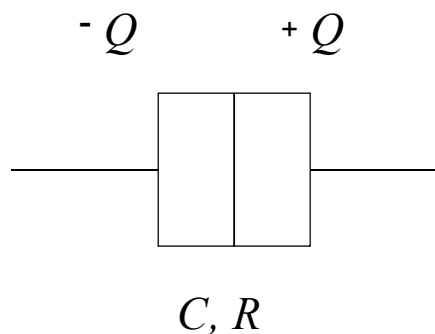


Рис.1. Одиночный туннельный переход.

Рассмотрим такой “туннельный конденсатор” (туннельный контакт), отключенный от внешней электрической цепи (рис.1.), на обкладках которого находится заряд Q . Электростатическая энергия такого конденсатора равна:

$$E_1 = \frac{Q^2}{2C}. \quad (1)$$

После туннелирования электрона с одного электрода на другой электростатическая энергия равна

$$E_2 = \frac{(Q - e)^2}{2C} \quad (2)$$

Для того, чтобы такой процесс был энергетически выгоден, необходимо чтобы разность энергий $E_2 - E_1$ была отрицательной, т.е. чтобы энергия системы уменьшилась:

$$\Delta E = E_2 - E_1 < 0 \Rightarrow |Q| > \frac{e}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, туннелирование возможно, если заряд на обкладках конденсатора $|Q| > e/2$, и наоборот, при $|Q| < e/2$, возникает состояние блокады туннелирования, получившее название “кулоновской блокады”.

Если такую систему подключить к идеальному источнику постоянного тока I ($I \ll e/RC$), заряд на обкладках будет линейно расти ($dQ/dt = I$). Каждый раз, когда он будет достигать значения $e/2$, будет происходить туннелирование электрона, причем через равные промежутки времени (с периодом $T = e/I$). Таким образом, будут происходить так называемые одноэлектронные колебания с частотой:

$$f = \frac{I}{e} \quad (4)$$

Напряжение на конденсаторе $V = Q/C$ и накопленная в нем энергия $E = Q^2/2C$ обратно пропорциональны его емкости C . При сверхмалых величинах емкости такого конденсатора, уже нельзя пренебречь изменением его зарядовой (кулоновской) энергии даже в том случае, если заряд на нем изменяется всего лишь на заряд одного электрона. Например, изолированная металлическая гранула, радиусом $r \sim 1$ мкм (собственная емкость такой гранулы составляет $C_{sp} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r \approx 10^{-16}$ Ф) и содержащая примерно 10^{10} атомов, изменит свою энергию после перехода на нее одного электрона на величину $\Delta E = e^2/2C \approx 1.3$ мэВ, а ее потенциал изменится на величину $\Delta V = e/C \approx 1.6$ мВ. Очевидно, что, если температурные флуктуации $k_B T$ не превышают ΔE , то изменение заряда такой гранулы всего на один электрон может быть, в принципе, зарегистрировано. Для приведенного выше случая

температура гранулы должна быть много меньше $\Delta E/k_B \approx 10$ К. Чтобы не ослабить зарядовые эффекты в такой системе и иметь возможность наблюдения за ней, соединение гранулы с внешним окружением может быть осуществлено через сверхмалые туннельные барьеры с собственными емкостями, не сильно превышающими емкость гранулы C , и туннельными сопротивлениями, существенно большими квантового, $R_Q = h/e^2 \gg 26$ кОм. Последнее условие обеспечивает незначительность влияния квантовых флуктуаций на процесс электронного туннелирования в вышеупомянутой системе.

Таким образом, в структурах с переходами, емкость C которых $< 10^{-16}$ Ф и сопротивление $R > 100$ кОм, можно получить измеримое в эксперименте изменение напряжения на переходе $V = e C \sim 10^{-3}$ В, вызванное единичным актом туннелирования. Согласно оценке такой эксперимент возможен при температуре $T \ll 4.2$ К.

Одноэлектронный транзистор

Одноэлектронный транзистор состоит из двух туннельных переходов (с параметрами $C_{1,2}, R_{1,2}$), металлического острова между ними и связанного с ним через нетуннельную емкость C_g затвора (рис. 2). Основные принципы работы одноэлектронного транзистора (за исключением квантовомеханического процесса туннелирования) легко понять из анализа классической электростатической системы. Пусть n - число избыточных электронов на острове транзистора, которое может быть как положительным, так и отрицательным, оставаясь при этом целым. Тогда изменение энергии системы при туннелировании электрона из правого электрода на остров (рис. 2) будет

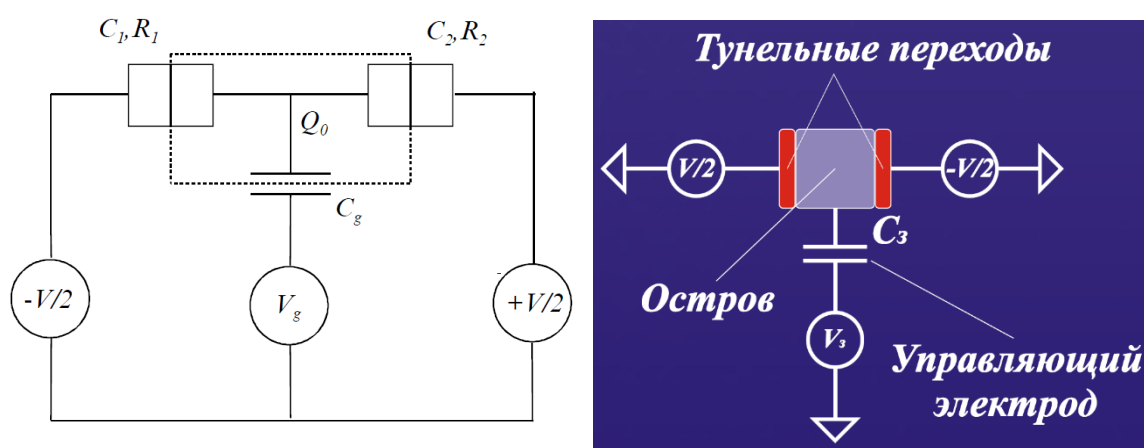


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема и схематическое изображение одноэлектронного транзистора.

определяться изменением электростатической энергии и работой источника напряжения по перераспределению зарядов в цепи. Изменение электростатической энергии равно

$$\Delta E_{\text{э.с.}} = \frac{[e(n+1)]^2}{2C_{\Sigma}} - \frac{(en)^2}{2C_{\Sigma}} = \frac{e(2n+1)}{2C_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где $C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_g + C_0$, а C_0 - собственная емкость острова транзистора. Заряд протуннелировавшего электрона - e , будучи локализованным теперь на острове транзистора, распределен между тремя конденсаторами C_1 , C_2 и C_g (C_0 пренебрежем ввиду ее малости в большинстве практических случаев) в соответствующих долях - eC_1/C_{Σ} , eC_2/C_{Σ} , eC_g/C_{Σ} . Чтобы сохранить напряжения смещения на транзисторе и его затворе неизменными, источник напряжения должен перераспределить заряды через электрическую цепь. Индуцированные находящимся на острове электроном заряды со стороны источников $V/2$, V_g , $-V/2$ равны, соответственно, $-eC_2/C_{\Sigma}$, $-eC_g/C_{\Sigma}$ и eC_1/C_{Σ} .

Полное изменение энергии системы при попадании одного электрона на остров через первый переход будет определяться изменением электростатической энергии и работой, совершенной источниками напряжения по перераспределению зарядов в цепи:

$$\Delta E_1 = \Delta E_{\text{э.с.}} - e \frac{VC_2}{2C_{\Sigma}} - e \frac{V_g C_g}{C_{\Sigma}} + e \frac{VC_1}{2C_{\Sigma}} - e \frac{V}{2}, \quad (6)$$

где $-e \frac{VC_2}{2C_{\Sigma}}$, $-e \frac{V_g C_g}{C_{\Sigma}}$ и $e \frac{VC_1}{2C_{\Sigma}} - e \frac{V}{2}$ работы источников $V/2$, V_g , и $-V/2$

соответственно.

Выражения для изменения энергии при различных направлениях туннелирования для каждого из двух переходов транзистора аналогичны приведенному выше (6).

При конечной температуре T вероятность туннелирования электронов через переход равна [2]:

$$\Gamma = \frac{\Delta E}{e^2 R_T} \frac{\Theta(\Delta E)}{1 - \exp(-\Delta E/kT)}, \text{ или } \Gamma = \frac{\Delta E}{e^2 R_T} \Theta(\Delta E) \text{ при } T=0 \quad (7)$$

где $\Theta(\Delta E) = 1$, если $\Delta E < 0$ и $\Theta(\Delta E) = 0$, если $\Delta E \geq 0$.

Когда ΔE_i положительно, туннелирование в данном направлении заблокировано (при $T=0$). Условие $\Delta E_i = 0$ определяет границы области Кулоновской блокады электронного туннелирования. Таким образом, состояние с n электронами на центральном острове транзистора стабильно (туннелирование отсутствует) когда:

$$\left. \begin{aligned} e(n - \frac{1}{2}) < C_g V_g + (\frac{C_g}{2} + C_2) V < e(n + \frac{1}{2}) \\ e(n - \frac{1}{2}) < C_g V_g - (\frac{C_g}{2} + C_1) V < e(n + \frac{1}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

На рис. 3 показана диаграмма стабильности транзистора на плоскости параметров транспортного и затворного напряжений ($V = V_b, V_g$). Белым цветом показаны области блокады тунnelирования - стабильные состояния транзистора с определенным количеством избыточных электронов n на центральном острове. Туннельный ток возникает при выходе из области блокады, когда система не находится более в стабильном состоянии и электроны туннелируют на остров и с острова. Зарядовые состояния острова смешиваются, его потенциал флуктуирует вокруг среднего значения, не обязательно соответствующему целому числу электронов на острове.

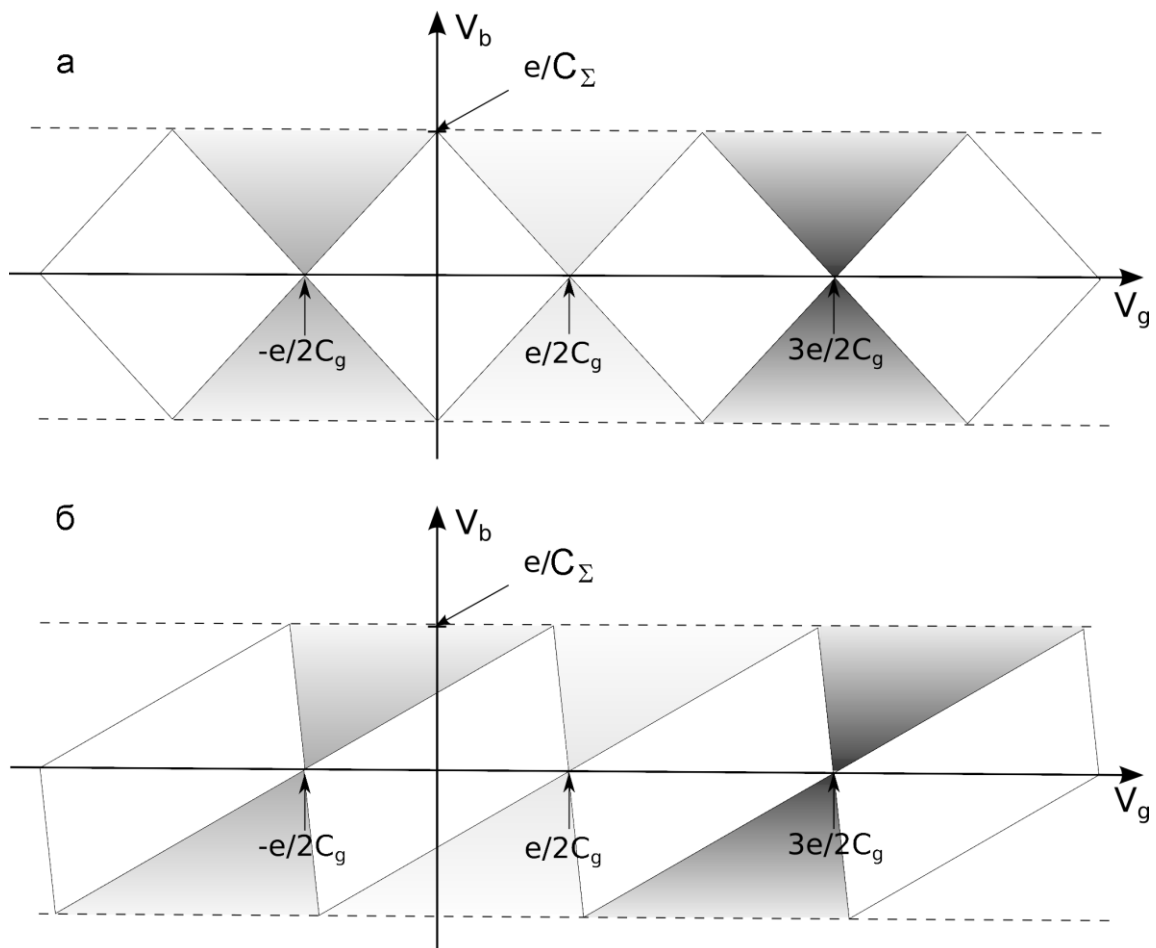


Рис. 3. Диаграммы стабильности симметричного (а) и асимметричного (б) одноэлектронных транзисторов. Светлые области - состояния кулоновской блокады.

На рис 4 показаны типичные характеристики одноэлектронного транзистора. Вольтамперная характеристика (рис. 4а) имеет четко выраженную область кулоновской блокады (сплошная линия) при напряжениях $|V| < V_{off} = e/C_{\Sigma}$ и нулевом напряжении на управляющем электроде. При напряжениях на управляющем электроде, соответствующих $Q = e/2 + me$, m - целое, туннелирование возможно при любых V и, в этом случае, вольтамперная характеристика (ВАХ) транзистора не имеет блокадного участка (пунктирная линия). Зависимость тока транзистора от величины поляризационного заряда Q_0 на центральном острове (или напряжения на затворе, $V_g = Q_0/C_g$) называется модуляционной характеристикой (рис. 4б) и имеет вид периодической функции с периодом по заряду в один электрон e - $I(Q_0+e) = I(Q_0)$. Максимальная амплитуда модуляции достигается при напряжении смещения V близком к напряжению V_{off} .

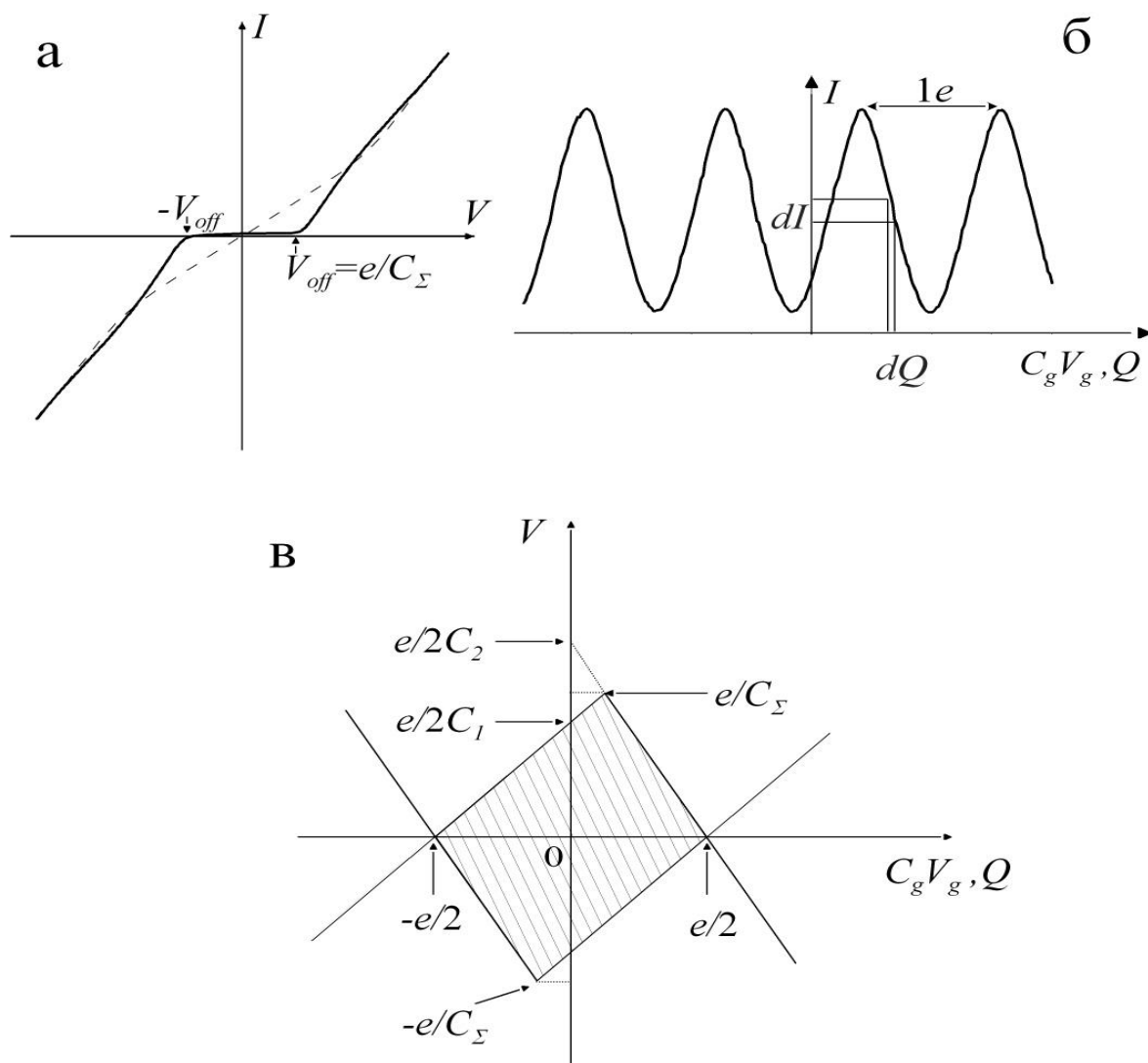


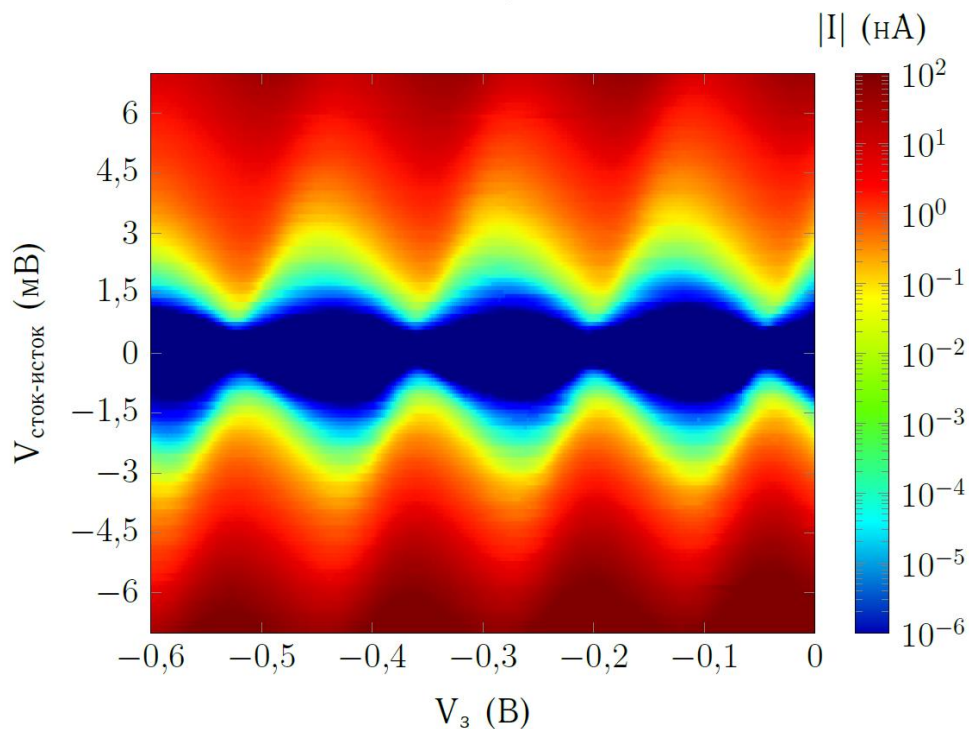
Рис. 4. а - ВАХ одноэлектронного транзистора (сплошная линия - состояние кулоновской блокады; пунктирная - отсутствие кулоновской блокады).

б - модуляционная характеристика одноэлектронного транзистора.

в - диаграмма стабильности одноэлектронного транзистора.

На рисунке 5 представлена экспериментально полученная диаграмма стабильности одноэлектронной структуры при температуре 15 мК, полученной в рефрижераторе растворения.

а



б

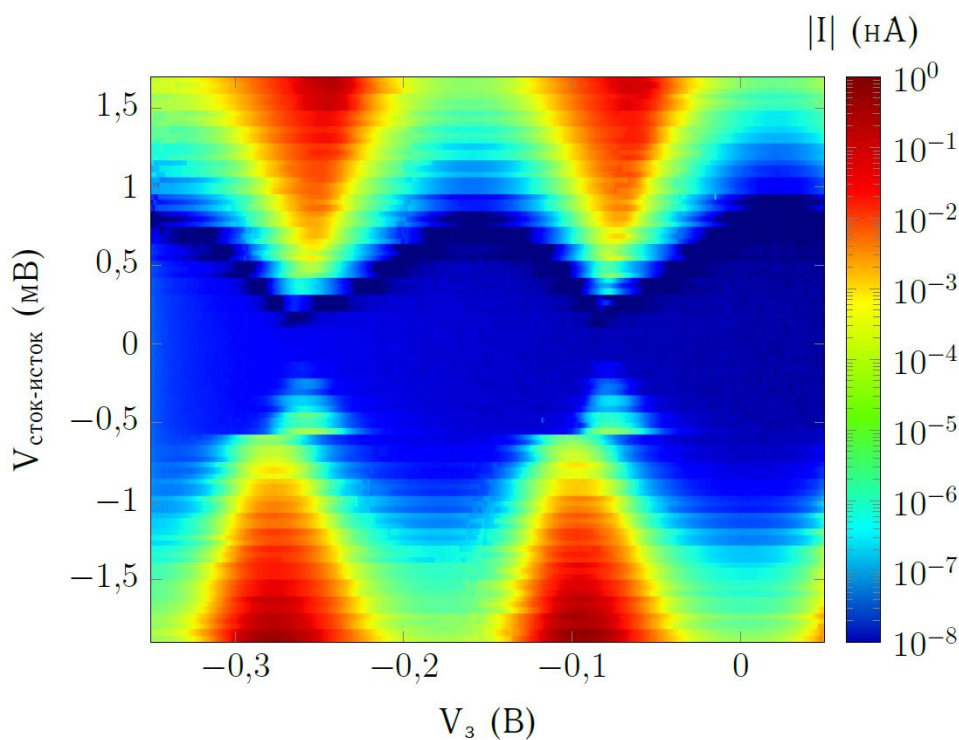


Рис. 5. **а**, **б** - диаграммы стабильности кремниевого одноэлектронного транзистора (сдвиг диаграммы (**б**) связан со скачком фонового заряда во время измерений). $T = 15$ мК.

Одноатомный транзистор на основе единичных примесных атомов

Использование отдельных атомов в качестве базовых элементов нанoeлектронных устройств — крайне привлекательная идея, поскольку атомы обладают стабильной электронной структурой и свойствами. Однозначные химические и физические свойства атомов позволяют на их основе делать воспроизводимые электронные элементы с уникальными зарядовыми и квантовыми свойствами. Отдельные атомы — единственные нанообъекты, у которых энергия размерного квантования по порядку величины совпадает с кулоновской энергией, что позволяет одновременно использовать эти физические эффекты для создания новых электронных устройств.

Первая работа, которую можно отнести к созданию одноатомного транзистора датируется концом 2006 года и была сделана в университете Дельфта (Нидерланды) и межуниверситетском микроэлектронном центре в Бельгии [9]. В этой работе авторы не утверждали, что они сделали одноатомный транзистор, т.к. в то время такое утверждение было слишком смелым, поскольку только в начале 2000-х годов появились первые экспериментально реализованные планарные молекулярные транзисторы и научное сообщество признало возможность протекания туннельного тока через одиночную молекулу.

В 2008 году в научной группе университетов Дельфта и Пердью был реализован полевой транзистор, при измерении которого удалось получить качественную диаграмму стабильности одиночного примесного атома. Что важно, в этой работе наблюдались *полосы соответствующие дискретным энергетическим уровням примеси и квантованным состояниям* в подводящих электродах [10]. Затем начиная с 2010 года последовала серия работ центра квантовых компьютерных технологий университета Нового Южного Уэльса в первой из которых был продемонстрирован атомный транзистор на основе 3-х близко расположенных примесных атомов [11]. В 2010 году в совместной научной группе Нового Южного Уэльса и Мельбурна было продемонстрировано одноэлектронное устройство на основе нескольких примесных атомов и двух управляющих электродов, с помощью которых были получены характерные шестиугольные диаграммы стабильности, показывающие взаимодействие двух примесных атомов в процессе туннельного транспорта. Группа из университета Гренобля в 2010 также продемонстрировала образец созданного полевого транзистора с примесным атомом в канале и продемонстрировала для таких транзисторов характерную диаграмму стабильности [12].

В 2012 году вышла ставшая достаточно знаменитой работа «A single-atom transistor» [13], выполненная сотрудниками квантовых центров университетов Нового Южного Уэльса,

Сиднея и Мельбурна, университета Пердью и корейского института науки и информационных технологий. В этой работе структура транзистора была сформирована контролируемым помещением одиночного атома фосфора между туннельными и управляющими электродами (Рис. 6). С этого момента возможность создания одноатомных транзисторов стала общепризнанной.

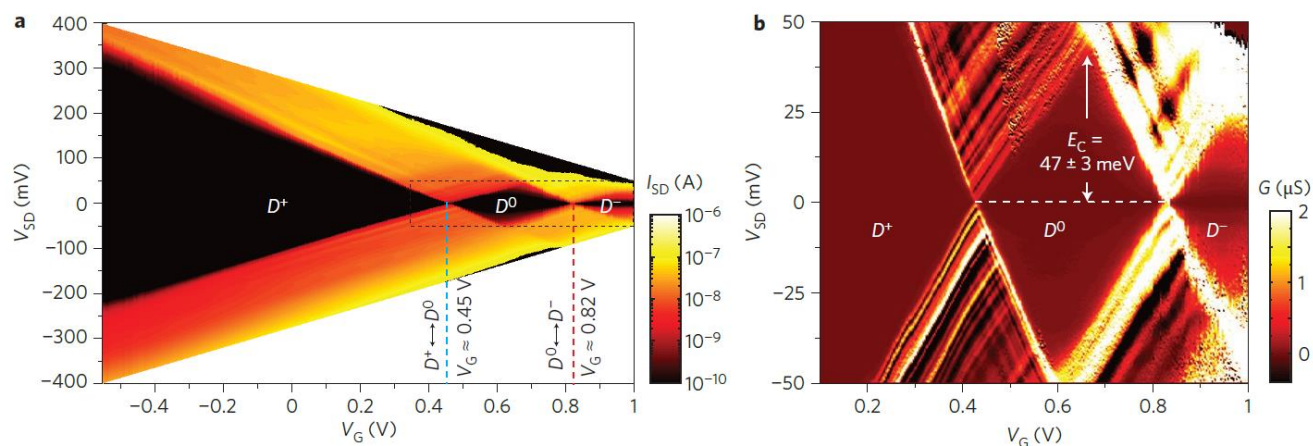


Рис. 6. Диаграмма стабильности структуры, сформированной контролируемым помещением одиночного атома фосфора между туннельными и управляющими электродами. Отчетливо видны полосы, соответствующие дискретным энергетическим уровням [13]

В работе [14] был изучен одноэлектронный транзистор на основе одиночных примесных атомов, схематичное изображение которого представлено на рис. 7. Он включал в себя полупроводниковый мостик с пониженной 10^{18} - 10^{19} см^{-3} концентрацией примеси, соединяющий туннельные электроды истока и стока. С целью формирования в мостике области с пониженной концентрацией примеси проводилось изотропное травление предварительной структуры транзистора, что приводило к удалению высоколегированного слоя с поверхности мостика и к его утоньшению до такой степени, что в объеме мостика оставался только один примесный атом. Атом примеси, внедренный в кристаллическую структуру мостика при легировании, являлся активным зарядовым центром – островом одноэлектронного транзистора.

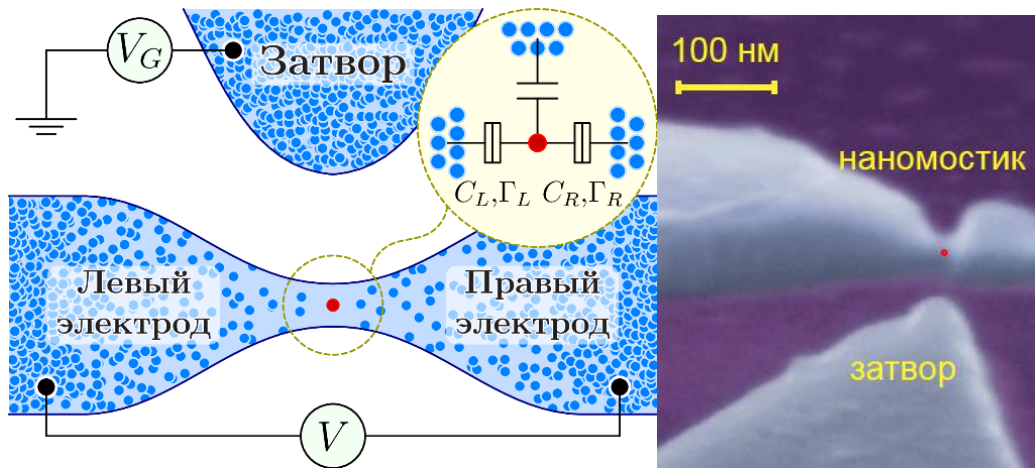


Рис. 7. Схематическое и реальное изображение одноатомного транзистора.

На рисунке 8 изображена диаграмма стабильности, различные размеры кулоновских ромбов соответствуют различным зарядовым энергиям и, следовательно, различным эффективным собственным емкостям атомных подболочек примесного атома.

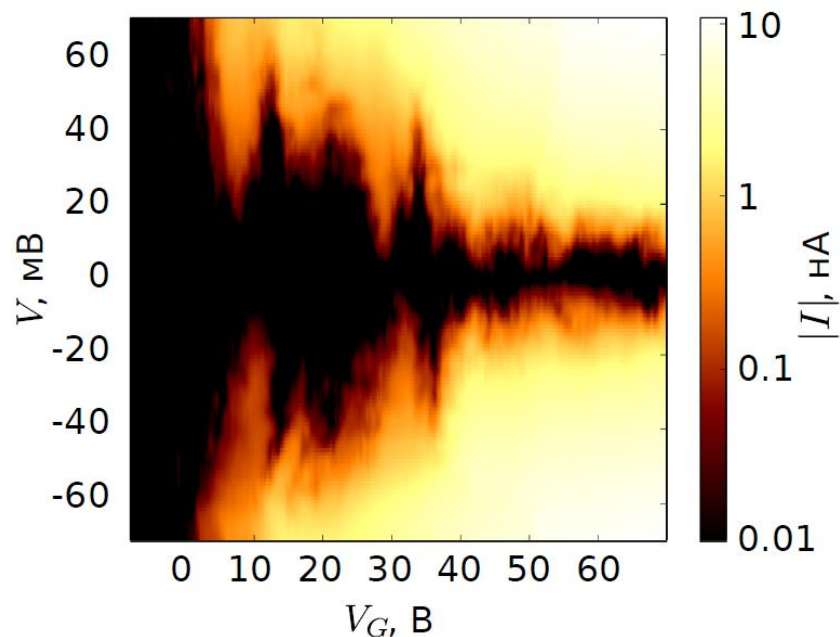


Рис. 8. Токовая диаграмма стабильности одноатомного транзистора в широком диапазоне транспортных V и затворных V_G напряжений.

Более высокие одночастичные энергетические уровни соответствуют большим собственным и взаимным емкостям. Наблюдаемые на диаграмме размывания и рваные края могут быть связаны с влиянием соседних примесных атомов, действующих как зарядовые ловушки, которые активируются достаточно высокой температурой (4.2 К) эксперимента.

Видно, что зарядовые ловушки оказывают более сильное влияние на одноэлектронный транспорт при более высоком напряжении затвора, что можно объяснить их активацией этим высоким напряжением, а также уменьшением их зарядовой энергии при накоплении электронов.

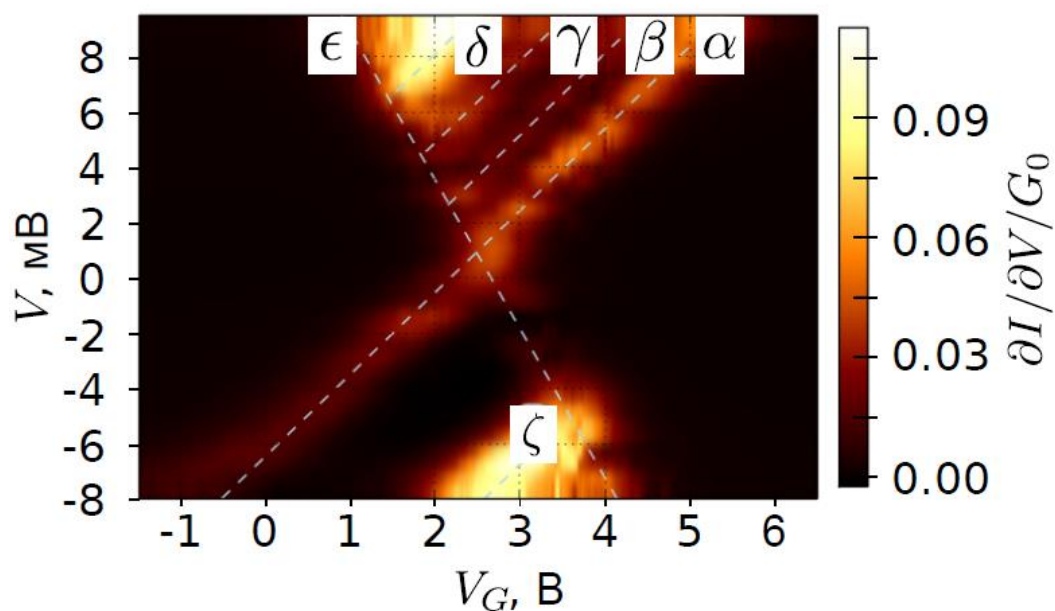


Рис. 1.6.3. Токвая диаграмма стабильности одноатомного транзистора при малых значениях транспортногo и затворных напряжений, на которой наблюдаются полосы.

Литература.

- [1] T. A. Fulton and G. J. Dolan, «Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions», *Physical review letters*, vol. 59, no. 1, p. 109, 1987.
- [2] K. K. Likharev, «Single-electron devices and their applications», *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 4, p. 606-632, 1999.
- [3] V. Krupenin, D. Presnov, M. Savvateev, et al., «Noise in al single electron transistors of stacked design», *Journal of applied physics*, vol. 84, no. 6, p. 3212-3215, 1998.
- [4] Y. Wei, J. Weis, K. v. Klitzing, and K. Eberl, «Edge strips in the quantum hall regime imaged by a single-electron transistor», *Physical review letters*, vol. 81, no. 8, p. 1674, 1998.
- [5] S. Kubatkin, A. Danilov, M. Hjort и др., “Single-electron transistor of a single organic molecule with access to several redox states”, *Nature*, т. 425, № 6959, с. 698—701, 2003.
- [6] P. M. Koenraad and M. E. Flatte, «Single dopants in semiconductors», *Nature materials*, vol. 10, no. 2, p. 91{100, 2011.
- [7] D. Goldhaber-Gordon, H. Shtrikman, D. Mahalu, et al., «Kondo effect in a single-electron transistor», *Nature*, vol. 391, no. 6663, p. 156-159, 1998.
- [8] E. Soldatov, V. Khanin, A. Trifonov, et al., «Single-electron transistor based on a single cluster molecule at room temperature», *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 64, no. 7, p. 556-560, 1996.
- [9] H. Sellier, G.P. Lansbergen, J. Caro, S. Rogge, N. Collaert, I. Ferain, M. Jurczak, and S. Biesemans, *Transport Spectroscopy of a Single Dopant in a Gated Silicon Nanowire. // Phys. Rev. Lett.* 97, 206805, (2006).
- [10] G.P. Lansbergen, R. Rahman, C.J. Wellard, I. Woo, J. Caro1, N. Collaert, S. Biesemans, G. Klimeck, L.C. Hollenberg and S. Rogge, *Gate-induced quantum-confinement transition of a single dopant atom in a silicon FinFET. // Nature Physics* 4, 656 (2008).
- [11] K.Y. Tan, K.W. Chan, M. Möttönen, A. Morello, C. Yang, J. van Donkelaar, A. Alves, J.-M. Pirkkalainen, D.N. Jamieson, R.G. Clark and A.S. Dzurak, *Transport Spectroscopy of Single Phosphorus Donors in a Silicon Nanoscale Transistor. // Nano Lett.*, 10 (1), 11 (2010).
- [12] M. Pierre, R. Wacquez, X. Jehl, M. Sanquer, M. Vinet and O. Cueto, *Single-donor ionization energies in a nanoscale CMOS channel. // Nature Nanotechnology* 5, 133 (2010).
- [13] M. Fuechsle, J.A. Miwa, S. Mahapatra, H. Ryu, S. Lee, O. Warschkow, L.C. Hollenberg, G. Klimeck, and M.Y. Simmons, *A single-atom transistor. // Nature nanotechnology*, 7 (4), 242, (2012).
- [14] «Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon», Shorokhov V.V., Presnov D.E., Amitonov S.V., Pashkin Yu A., Krupenin V.A., *Nanoscale* 9, 613-620 (2017)

Проведение эксперимента.

Не включайте компрессор во время откачки криостата, так как существует риск загрязнения вакуумного пространства криостата. При нормальном использовании клапан порта вакуумной откачки должен быть закрыт при работающем компрессоре. Также при работающем компрессоре турбина должна быть остановлена.

При нагревании криостата до комнатной температуры (для замены образца или в конце эксперимента) не открывайте клапан порта вакуумной откачки для воздуха, пока температура криостата не станет выше локальной точки росы, иначе вода будет конденсироваться на холодных внутренних поверхностях. Это может загрязнить сорбирующий элемент и привести к ухудшению вакуума при следующем охлаждении системы, что, в свою очередь, может остановить охлаждение криостата до ожидаемой базовой температуры.

Работа производится в перчатках, с использованием заземления. Перед началом работы рекомендуется ознакомиться с видеоруководством. Убедиться в наличии всех необходимых инструментов:



Ход работы:

1. Открыть кран воды для охлаждения компрессора.



2. Включить блок контроля температурой Mercury iTC и ПК с программным комплексом на базе National Instruments (LabVIEW).
3. Включить вакуумный откачной пост.
4. Включить нагревательную плитку, выставить температуру в 100 °С.

Упражнение 1: Загрузка образца.

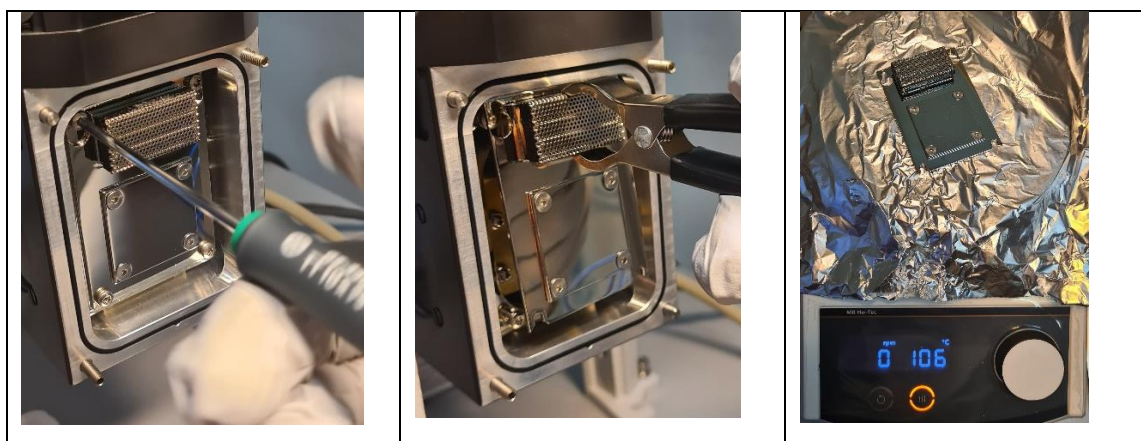
1. Убедиться, что криостат находится при комнатной температуре.
2. Напустить воздух в криостат. Для этого необходимо открыть вентиль вакуумной системы и на блоке управления откачного поста выбрать с помощью стрелочек пункт меню 12 «EnableVent» и активировать его.



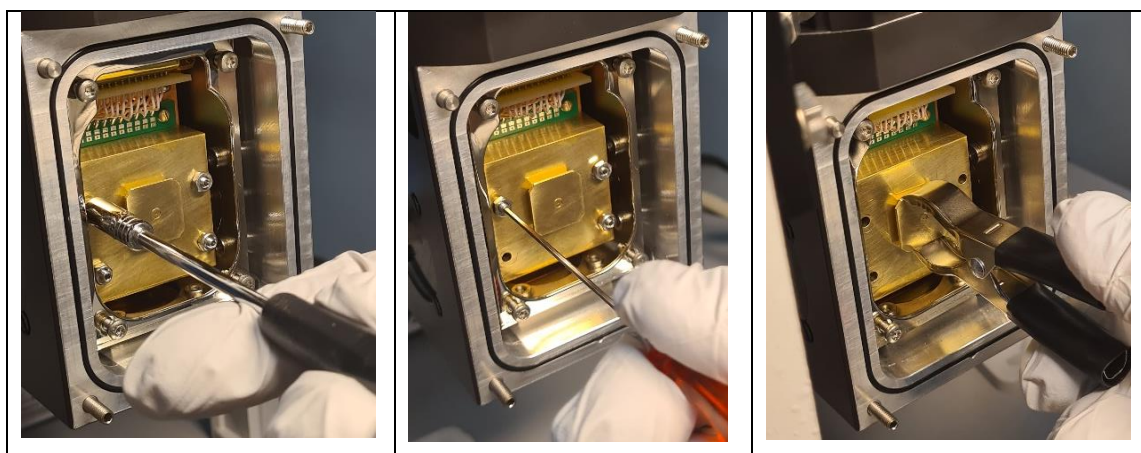
3. Дождаться напуска воздуха в камеру. Открутить крепежные винты крышки камеры криостата. Снять крышку камеры криостата.



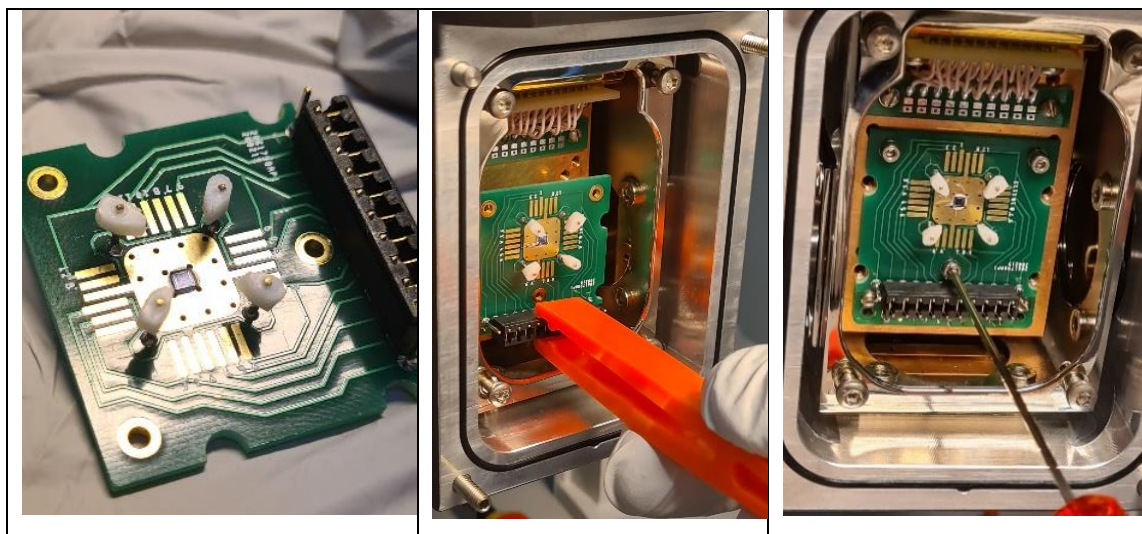
4. Слегка ослабив винты, снять экран с сорбентом и поместить его на плитку, разогретую до 100 °С.



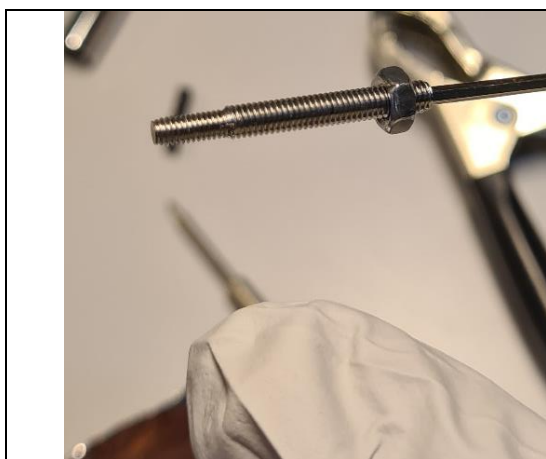
5. Снять крышку держателя образца. Сначала ослабьте гайки, затем, аккуратно придерживая крышку, выкрутите винты/шпильки. **Выключить напуск воздуха на блоке управления откачного поста.** Перейти в пункт меню 23 и убедиться, что турбина остановлена.



6. Закрепить образец в держателе, соединив его контакты с контактами держателя, закрепить образец с помощью винтов.

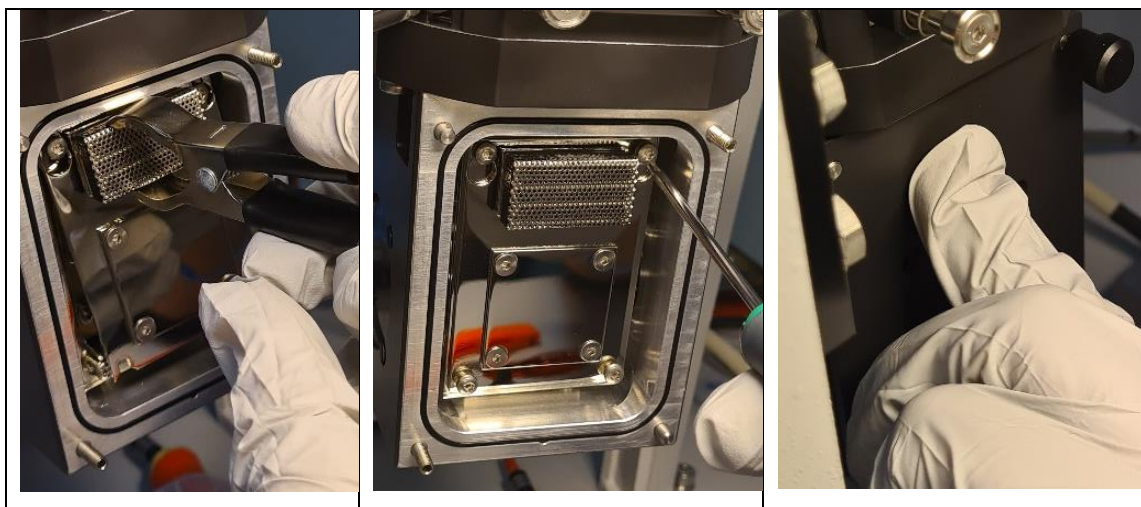


7. Закрыть крышку держателя. Теперь наоборот, сначала вкрутите винты/шпильки, затем затяните гайки.



Обратите внимание, что из себя представляет винт/шпилька с гайкой. **Не следует сильно затягивать винт**, поскольку он вкручивается в мягкий медный держатель.

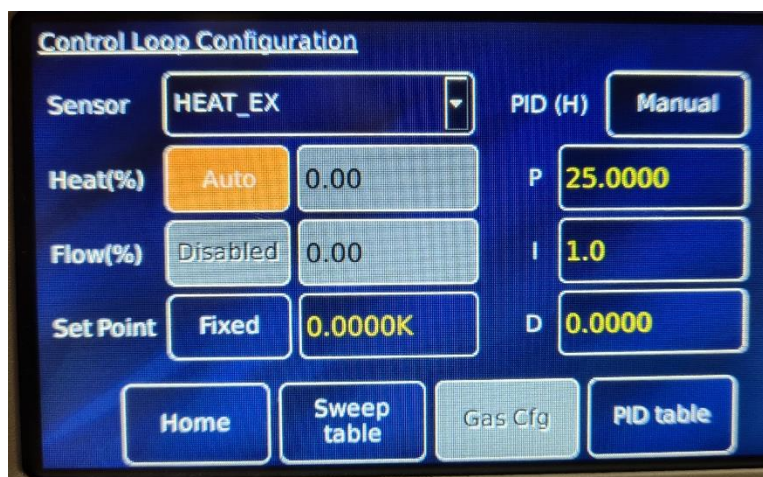
8. Снять с плитки экран с сорбентом и закрепить его, закрыть крышку камеры криостата. Это необходимо сделать быстро, пока сорбент не остыл.



9. Включить откачку. Для этого необходимо сначала включить форвакуумный насос. Подождать. Затем на блоке управления откачного поста перейти в пункт меню 23 и включить турбомолекулярный насос.

Упражнение 2: Достижение заданной температуры.

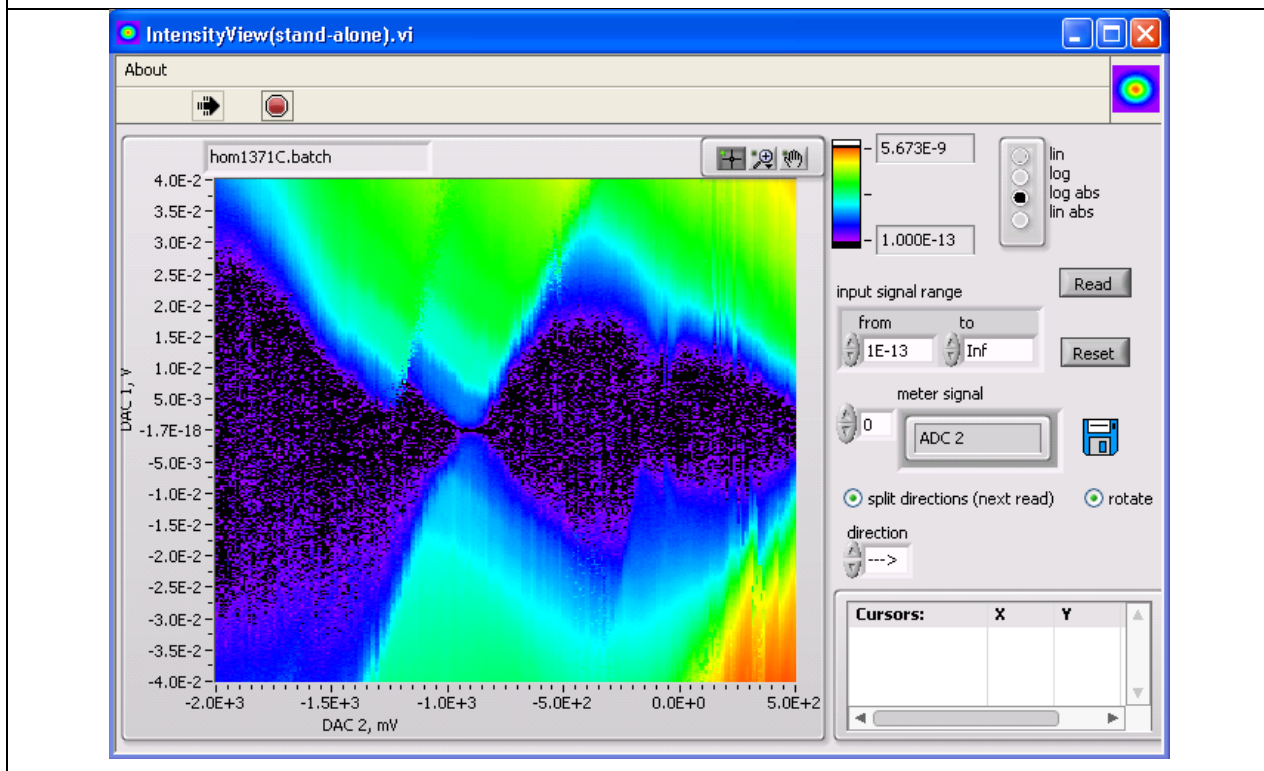
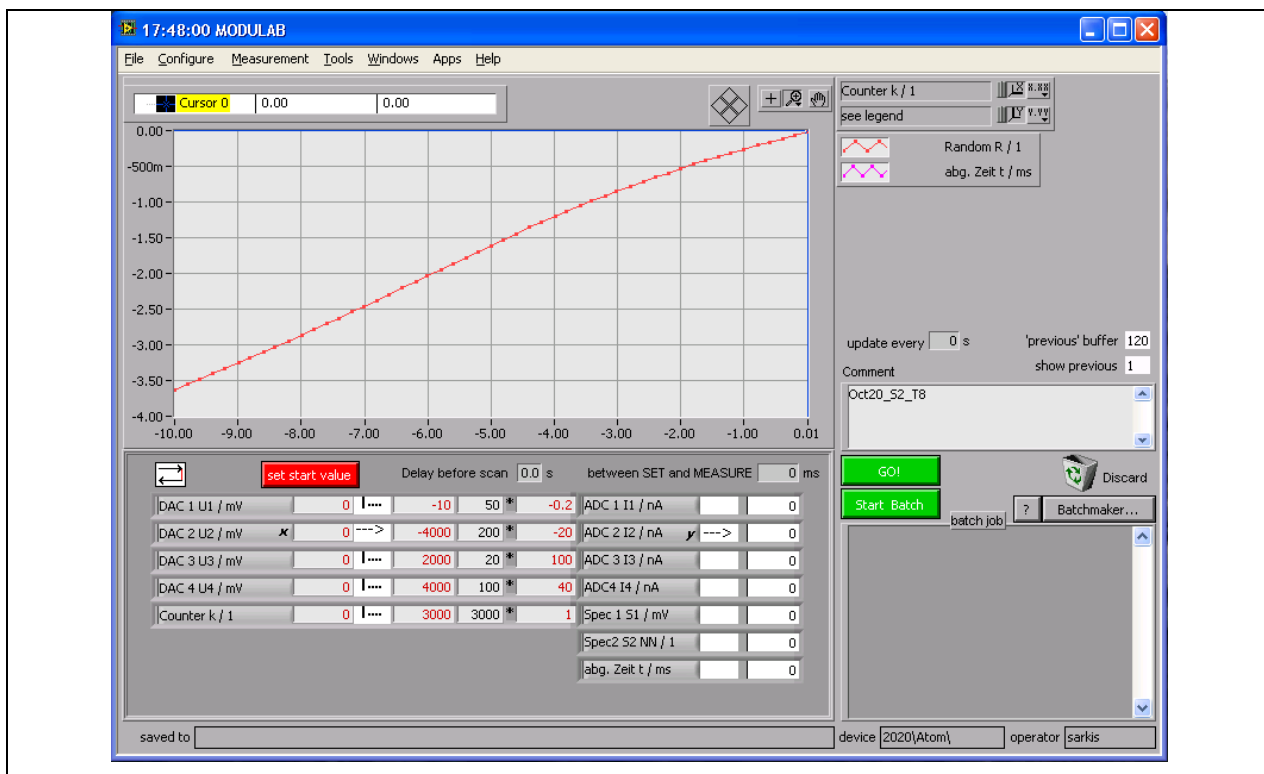
1. На время откачки следует выставить температуру 300K при помощи блока контроля температурой Mercury iTC



2. Дождаться откачки камеры до 10^{-4} гПа. Закрыть вентиль. **Выключить откачку.**
3. Выставить необходимую температуру с помощью блока контроля температурой.
4. Проверить, что открыт кран с водой. Включить компрессор и проверить давление (около 150 psi). Дождаться охлаждения до нужной температуры.

Упражнение 3. Измерение транспортных характеристик одноатомного транзистора.

Измерение характеристик одноатомных транзисторов производится в программной среде MODULAB, визуализировать измеряемую диаграмму можно с помощью программы Intensity View.



1. Подготовить программу к измерениям:

1) Запустить программу Modulab. Начать работу нажатием кнопки с изображением стрелки в верхней части лицевой панели программы.

2) В контекстном меню Configure-User and Sample Profile выбрать директорию, куда будут сохраняться экспериментальные данные.

3) При необходимости сменить значок с изображением урны и подписью «Discard» на изображение дискеты с подписью «Save» для последующего сохранения всех файлов.

4) Выбрать режим развертки с помощью иконки слева от кнопки “Set start value”. В случае активации иконки с двумя противоположенными стрелками после завершения развертки будет удерживаться конечное значение напряжения. В случае сонаправленных — будет возвращено начальное значение напряжения.

2. Измерить вольт-амперную характеристику. Делается это следующей последовательностью действий:

1) Активировать развёртку по напряжению на выходе DAC1. Для этого сменить значок «|...» на «--->»

2) Дезактивировать развёртку на остальных выходах (DAC2, DAC3, DAC4). Для этого в аналогичных окнах других строк установить значок «|...»

3) Выставить значение начального напряжения на выходе DAC1 равным 0 мВ (первый столбец числовых значений), а конечное значение (второй столбец с числами) выбрать исходя из типа измеряемого транзистора. Для образцов с примесями мышьяка типично значение около 50 мВ.

4) Выставить желаемый шаг (третий столбец с числами) или число точек (четвертый столбец).

5) Нажать кнопку Start.

6) По аналогии провести измерение для симметричного относительно нуля диапазона напряжений, к примеру, от -50 до +50 мВ.

3. Проверить, что отсутствует проводимость между затвором и токопроводящими электродами транзистора:

1) Активировать развёртку по напряжению на выходе DAC2. Для этого сменить значок «|...» на «--->»

2) Дезактивировать развёртку на остальных выходах (DAC1, DAC3, DAC4). Для этого в аналогичных окнах других строк установить значок «|...»

3) Выставить значение начального напряжения на выходе DAC2 равным 0 мВ (первый столбец числовых значений), а конечное значение (второй столбец с числами) выбрать исходя из типа измеряемого транзистора. Для образцов с SAG с предельно близкими затворами около 5000 мВ.

4) Обнулить напряжение на выходе DAC1. Для этого установить в окошке начального значения нуль и нажать “Set start value”

5) Нажать кнопку Start.

6) Следить за значением тока во время измерений. Обычно оно не превышает единиц или десятков пА. В случае приближения к значению 50 нА остановить измерения кнопкой “Stop” и обнулить напряжение на выходе DAC2. Такое поведение означает непригодность транзистора для дальнейших измерений в этом диапазоне напряжений.

4. Измерить характеристику управления при ненулевом смещении.

1) Активировать развёртку по напряжению на выходе DAC2 и дезактивировать на остальных выходах.

4) Выставить на выходе DAC1 небольшое смещение. Для этого установить в окошке начального значения нужное значение в мВ и нажать “Set start value”. Для образцов на основе примесного атома мышьяка, как правило, выбирается значение в диапазоне 1 — 10 мВ.

5) Нажать кнопку Start.

5. По характеристике управления по положению пиков транспортного тока понять при каких напряжениях на затворе происходит разблокировка транзистора. Больше всего информации далее будет получено при измерениях около этих значений.

6. Произвести измерение диаграммы стабильности системы в широком интервале значений. Такие измерения лучше проводить серией измерений характеристик управления.

1) По проведённым ранее измерениям провести выбор интервала измерений.

2) Активировать развёртку по напряжению на выходе DAC2 и дезактивировать на остальных выходах.

3) Установить требуемый интервал напряжений и шаг на выходе DAC2.

4) Установить крайнее для выбранного диапазона значение напряжения смещения. Для этого установить в окошке начального значения DAC1 нужное значение в мВ и нажать “Set start value”

5) Зайти в batchmaker и выбрать DAC1 в качестве first outer layer. Установить нужный интервал значений DAC1 и шаг для него.

6) Сформировать массив значений DAC1 нажав кнопку → . Нажать Ок, таким образом сформировав программу для измерения диаграммы стабильности

7) Выбрать в Configure-User and Sample Profile отдельную папку для сохранения этой серии измерений.

8) Заменить иконку save на discard. Нажать Start. Таким образом можно проверить готовность к измерениям: оценить адекватность выбранного диапазона, повторяемость характеристик, примерное время измерения двумерной диаграммы.

При необходимости подкорректировать программу.

9) Нажать Start Batch.

10) Визуализировать измеряемую диаграмму можно с помощью программы Intensity View, открыв batch файл в папке с проводимыми измерениями. Наиболее информативна диаграмма при выборе режима log abs.

7. После измерения в широком диапазоне провести измерения в узком диапазоне. Для этого на полученной диаграмме выбрать диапазон напряжений на затворе, внутри которого значения тока наименее зашумлены.

8. Провести измерения диаграммы в узком диапазоне. Такие измерения лучше проводить серией вольт-амперных характеристик, для возможности последующего дифференцирования данных и получения данных о дифференциальной проводимости системы.

1) Активировать развёртку по напряжению на выходе DAC1 и деактивировать на остальных выходах.

2) Установить требуемый интервал напряжений и шаг на выходе DAC1.

3) Установить крайнее для выбранного диапазона значение напряжения на затворе. Для этого установить в окошке начального значения DAC2 нужное значение в мВ и нажать “Set start value”

5) Зайти в batchmaker и выбрать DAC2 в качестве first outer layer. Установить нужный интервал значений DAC2 и шаг для него.

6) Сформировать массив значений DAC2 нажав кнопку → . Нажать Ок, таким образом сформировав программу для измерения диаграммы стабильности

7) Выбрать в Configure-User and Sample Profile отдельную папку для сохранения этой серии измерений.

8) Заменить иконку save на discard. Нажать Start. Таким образом можно проверить готовность к измерениям: оценить адекватность выбранного диапазона, повторяемость характеристик, примерное время измерения двумерной диаграммы. При необходимости подкорректировать программу.

9) Нажать Start Batch.

Упражнение 4. Анализ экспериментально полученных данных: транспортных характеристик, построение диаграммы стабильности

После проведения эксперимента.

1. Выключить компрессор.
2. Плавно закрыть кран с водой.
3. По указанию преподавателя произвести выгрузку образца по аналогии с загрузкой.

Задания для самостоятельной работы.

- 1) Изучить способы создания одноатомных одноэлектронных структур.
- 2) Изучить принципы работы классических одноэлектронных устройств и их реализацию на основе единичных примесных атомов.
- 3) Проанализировать полученные данные: построить ВАХ и управляющие характеристики, построить диаграмму стабильности.
- 4) Оценить величину характерной Кулоновской энергии измеренной одноатомной структуры.
- 5) Определить предельную рабочую температуру одноатомной структуры.

Контрольные вопросы и задания для проверочной работы.

- 1) В чем заключается явление Кулоновской блокады в мезоскопических структурах на основе туннельных переходов?
- 2) Что такое примесные атомы?
- 3) Особенности структуры одноатомного транзистора.
- 4) Описать принцип работы классического и одноатомного одноэлектронных транзисторов.
- 5) Способы создания одноатомных структур.
- 6) От чего зависит рабочая температура одноатомных структур?

Отчет.

В качестве отчета необходимо предоставить транспортные характеристики и диаграмму стабильности.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы.

1. «Single-Atom Nanoelectronics», Enrico Prati, Takahiro Shinada, Jenny Stanford Publishing (2013)
2. «Theory of single-electron charging of quantum wells and dots», D. V. Averin, A. N. Korotkov, and K. K. Likharev, Phys. Rev. B 44, 6199 (1991)
3. «Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon», Shorokhov V.V., Presnov D.E., Amitonov S.V., Pashkin Yu A., Krupenin V.A., Nanoscale 9, 613-620 (2017)
4. «Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale», Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E., Soldatov E.S., Trifonov A.S., Krupenin V.A., Nanotechnology 28, 225304 (2017)
5. «A single-atom transistor», Martin Fuechsle, Jill A. Miwa, Suddhasatta Mahapatra, Hoon Ryu, Sunhee Lee, Oliver Warschkow, Lloyd C. L. Hollenberg, Gerhard Klimeck & Michelle Y. Simmons, Nature Nanotechnology 7, 242–246 (2012)
6. «ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ», Крупенин В.А., Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Москва, 2018, 266
7. «ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ЗАРЯДОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ», Дагесян С.А., Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2017, 118