

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**ПАРФЕНОВ В.В.**

**КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ В  
ЭЛЕКТРОНИКЕ: ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ  
И КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ**

методическое пособие к практикуму по физике полупроводников

Казань 2007

Печатается по решению Научно-методического совета физического факультета

**Рецензент:** Петухов В.Ю. д.ф-м.н., зав.лаб. РХР КФТИ КазНЦ РАН

**Парфенов В.В.** Квантово-размерные структуры в электронике: транзисторные структуры и клеточные автоматы (элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам). Методическое пособие для студентов физического факультета. Казань. 2007. 16 с.

Методическое пособие предназначается для студентов четвертого курса специализации «физика твердого тела» при выполнении ими работ на практикуме по физике полупроводников. Оно также может быть полезно при изучении соответствующих разделов общих лекционных курсов «Физика твердого тела», «Физика конденсированного состояния вещества», спецкурсов «Физика магнитных материалов и полупроводников» и «Квантово-размерные эффекты в гетероструктурах».

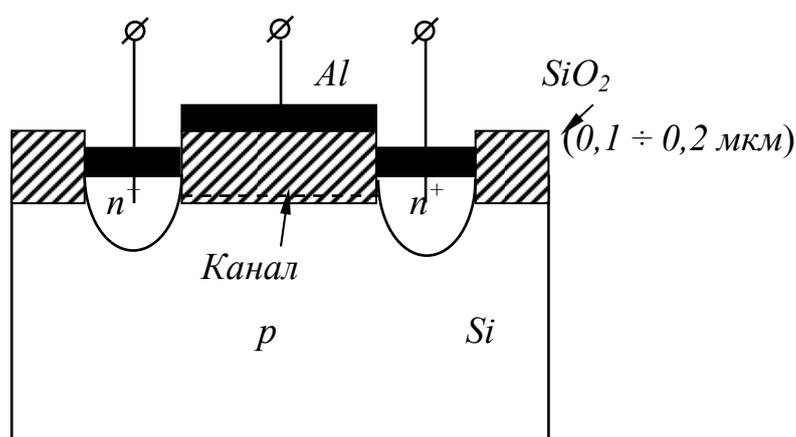
© Физический факультет Казанского государственного университета, 2007

## 1. МДП-структуры. Транзисторы с высокой подвижностью электронов

Исторически к первым типам электронных приборов с размерным квантованием электронного газа следует, по-видимому, отнести транзисторы с изолированным затвором, которые в настоящее время являются наиболее распространенным типом полевых транзисторов. В первую очередь это связано с простотой и высокой технологичностью конструкции, что позволяет использовать транзисторы такого типа в качестве основных компонентов интегральных микросхем. Устройство транзистора с изолированным затвором показано на рис. 1.

Затвор представляет собой тонкую пленку металла, нанесенную на поверхность высококачественного диэлектрика – оксида кремния  $\text{SiO}_2$  или, реже, нитрида кремния –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Исток и сток выполнены в виде сильнолегированных  $n^+$ -областей в подложке - полупроводниковой пластинке  $p$ -типа. Другое название этой конструкции: МОП или МДП-транзистор является аббревиатурой словосочетаний «металл – оксид - полупроводник», «металл – диэлектрик - полупроводник».

*Исток Затвор Сток*



*Рис. 1. Конструкция МДП-транзистора с каналом n-типа.*

При отсутствии напряжения на затворе сопротивление между истоком и стоком, определяемое двумя включенными навстречу друг другу  $p$ - $n$  переходами, оказывается очень высоким. Если же подать на затвор достаточно большое положительное напряжение, то возникающее сильное

электрическое поле существенно увеличивает концентрацию электронов в тонком поверхностном слое  $p$ -полупроводника и изменяет тип его проводимости на противоположный. Этот тонкий слой  $n$ -типа, называемый инверсионным, образует проводящий индуцированный канал, соединяющий  $n^+$ -области истока и стока. При увеличении положительного напряжения затвора толщина  $n$ -слоя и его проводимость возрастают, чем и обеспечивается управление выходным током транзистора. При этом величина тока во входной цепи - цепи затвора транзистора оказывается исключительно малой, так как сопротивление изоляции затвора достигает  $10^{12}$  Ом.

Пороговое напряжение затвора, при котором возникает заметная проводимость канала, составляет обычно от десятков милливольт до нескольких вольт.

В транзисторах с изолированным затвором канал может быть образован с помощью специально нанесенного на поверхность полупроводника тонкого слоя с противоположным, по отношению к подложке, типом проводимости. Такие приборы носят название МДП-транзисторов со встроенным каналом.

Зонная диаграмма МДП-структуры с индуцированным каналом приведена на рис.2.

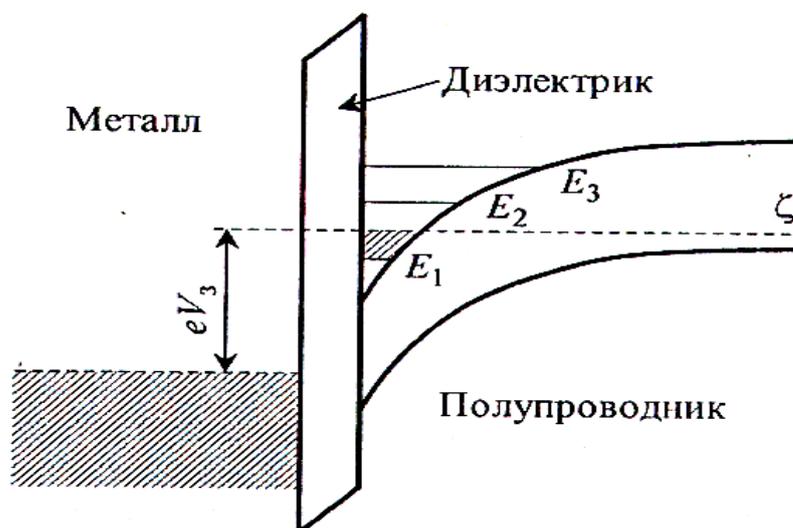


Рис.2. Зонная диаграмма МДП-структуры.

На металлический затворный электрод, отделенный слоем диэлектрика толщиной  $d$ , подается напряжение  $V_3$ , создающее в полупроводнике приповерхностный изгиб зон. Для достаточно больших  $V_3$  этот изгиб может стать порядка ширины запрещенной зоны. При этом в полупроводнике вблизи границы с диэлектриком образуется тонкий инверсионный слой, содержащий носители противоположного знака (в данном случае – электроны). Рассматривая металлический затвор и инверсионный слой как две обкладки плоского конденсатора, легко заключить, что двумерная плотность электронов в слое  $n_s$  (плотность электронов на единицу площади двумерного электронного газа) будет пропорциональна напряжению на затворе:

$$n_s = (V_3 - V_0) \varepsilon_d / 4\pi e d, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_d$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $V_0$  - пороговое напряжение, соответствующее открытию инверсионного канала, т.е. появлению в нем электронов.

Инверсионный слой представляет собой потенциальную яму для электронов, где одной стенкой является граница с диэлектриком, а роль второй стенки играет электростатический потенциал

$$e\Phi(z) = eEz, \quad (2)$$

прижимающий электроны к границе. Здесь

$$E \approx 4\pi e n_s / \varepsilon_s \quad (3)$$

- электрическое поле в инверсионном слое, которое пропорционально напряжению на затворе,  $\varepsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Особенностью МДП – структур, отличающей их от других квантово-размерных систем, является возможность управления концентрацией электронов  $n_s$ . Она может изменяться в широких пределах при изменении напряжения на затворе  $V_3$ . Максимальное значение  $n_s$  определяется

максимальным значением напряжения, которое можно приложить к затвору без риска пробоя диэлектрика. Для кремниевых структур оно имеет порядок  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Изменение напряжения на затворе меняет одновременно концентрацию двумерных носителей  $n_s$  и расстояние между уровнями размерного квантования. Этим МДП-структура отличается от тонкой пленки, где концентрация и энергия уровней определяются соответственно уровнем легирования и толщиной пленки и могут меняться независимо. Существует еще одно различие между МДП-структурами и тонкими пленками. Последние представляют собой потенциальную яму для обоих типов носителей, и квантование энергии имеет место как для электронов, так и для дырок. В МДП-структурах, где ограничивающий потенциал имеет электростатическую природу, квантуется энергия лишь одного типа носителей. Для другого типа носителей потенциальная яма отсутствует и спектр остается непрерывным.

При напряжении между стоком и истоком транзистора, равном  $V_C$ , в канале будет течь ток:

$$I_C = e\mu n_s V_C b/l, \quad (4)$$

где  $b, l$  - ширина и длина канала,  $\mu$  - подвижность носителей в нем.

Изменяя с помощью затвора концентрацию в канале  $n_s$ , можем осуществлять управление током исток – сток аналогично тому, как в обычном транзисторе напряжение базы управляет током коллектор-эмиттер. Важнейшая характеристика транзистора – крутизна  $S$  - в нашем случае определяется выражением

$$S = dI/dV_3 = \varepsilon_d b \mu V_C / 4\pi dl. \quad (5)$$

Видно, что крутизна полевого транзистора пропорциональна подвижности носителей. На самом деле полностью использовать преимущества высокой подвижности двумерного газа и получить транзисторы с крутизной, во много раз большей, чем у обычных МДП – транзисторов, не удастся. Причина в

том, что в реальных приборах для получения высокого быстродействия и высокой плотности интеграции расстояние между истоком и стоком делается весьма малым  $l < 1\text{мкм}$ . При этом напряженность поля в канале настолько велика, что дрейфовая скорость электронов не пропорциональна полю, а выходит на насыщение. В результате крутизна слабее зависит от подвижности носителей.

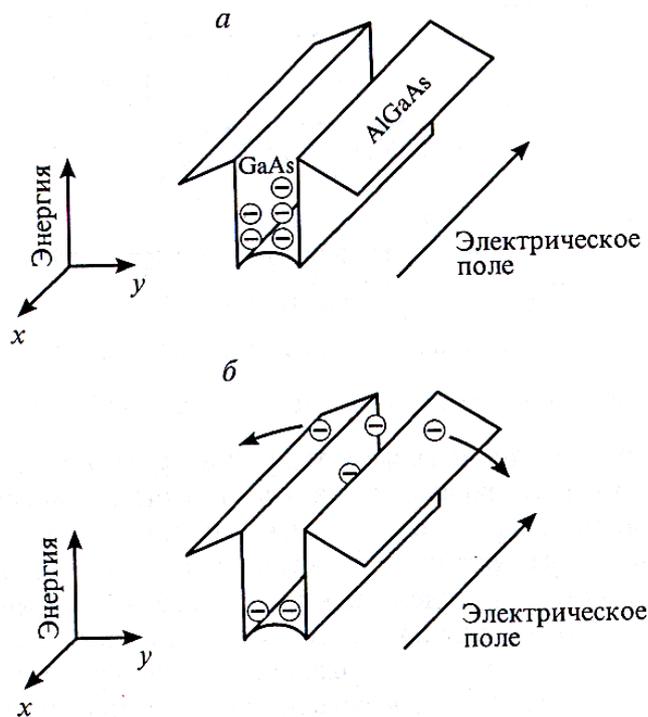
Другие важные параметры – характерное время переключения и энергетические затраты на одно переключение транзистора – также могут быть уменьшены по сравнению со стандартными полевыми транзисторами на однородном газе.

## **2. Транзисторы на горячих электронах.**

К настоящему времени разработаны два типа транзисторов, для работы которых существенное значение имеет тот факт, что электроны, пролетающие через канал или базу, являются горячими, т. е. имеют кинетическую энергию значительно выше равновесной.

В первом типе транзисторов на основе горячих электронов используется структура полевого транзистора с высокой подвижностью носителей заряда. В таком транзисторе ток течет в канале, образованном двумерным электронным газом. При увеличении электрического поля в канале температура электронов возрастает и может оказаться настолько высокой, что электроны могут с помощью термоэлектронной эмиссии перейти в слой широкозонного твердого раствора, где их скорость становится малой (рис.3).

Такой механизм протекания тока может привести к образованию отрицательной дифференциальной проводимости канала. Работа полевого транзистора с отрицательным сопротивлением – ПТОС – основана на этом принципе.



*Рис.3. Иллюстрация переноса электронов через канал протекания тока с двумерным электронным газом.*

*а – в слабом электрическом поле электроны локализованы в одномерной потенциальной яме; б – в сильном электрическом поле значительная часть электронов приобретает от поля энергию, достаточную для выхода из потенциальной ямы.*

Возрастание температуры электронов с ростом напряжения сток-исток приводит к увеличению тока  $I_{гор}$ , протекающего от канала (эмиттера) через барьер к коллектору, и, следовательно, к уменьшению тока сток-исток, т.е. к отрицательному дифференциальному сопротивлению канала (рис.4). Преимущество такого прибора – возможность реализации более быстродействующих режимов работы, т.к. управление током эмиттер-коллектор в этом случае связано с разогревом электронов. Изменение температуры электронов ограничено наибольшим из двух характерных времен – временем релаксации энергии и временем изменения электрического поля. Последнее определяется временем пролета электронов через область сильного поля вблизи стока и может быть в несколько раз

короче времени их пролета через весь канал, которое ограничивает собственное быстродействие обычных полевых транзисторов.

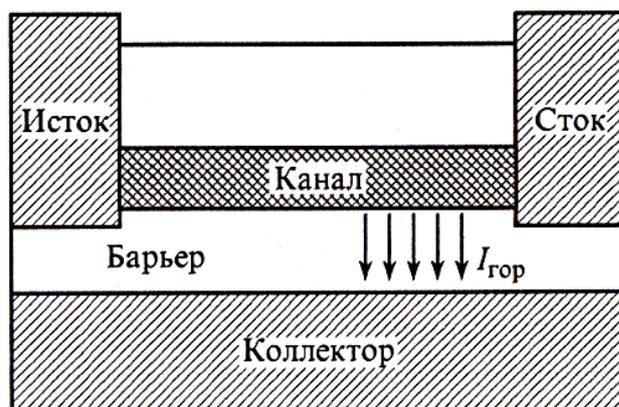


Рис.4. Схематическое изображение структуры ПТОС – транзистора

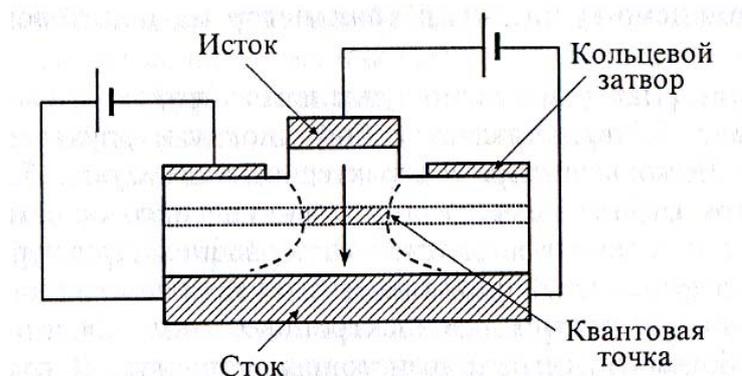
Помимо высокого быстродействия транзисторов на горячих электронах такого типа привлекает возможность построения на их основе новых приборов – с расширенными функциональными возможностями. Например, в четырехэлектродной структуре, которая может быть получена добавлением к ПТОС еще одного электрода, подобного стоку или истоку, может быть реализована логическая функция, для выполнения которой на обычных элементах требуется использовать несколько транзисторов.

Изготовление такого транзистора оказалось возможным только после решения проблем, связанных с выбором полупроводникового материала для слоя базы, улучшением технологии нанесения слоев, оптимизацией энергетической структуры транзистора, учетом и использованием квантово-размерных эффектов. Поиски оптимального построения униполярного прибора привели к созданию транзистора на горячих электронах с резонансным туннелированием.

### **3.Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке.**

Двухбарьерная резонансно-туннельная структура представляет собой диодную, двухэлектродную структуру. Такой резонансно-туннельный диод может быть использован как отдельный прибор при построении электронных схем, так и в качестве элемента более сложных транзисторных структур. В транзисторе на горячих электронах он используется в качестве барьера

эмиттер – база. Такой резонансно-туннельный транзистор можно создать, если использовать резонансное туннелирование не через двухбарьерную структуру, а через квантовую точку (рис. 5).

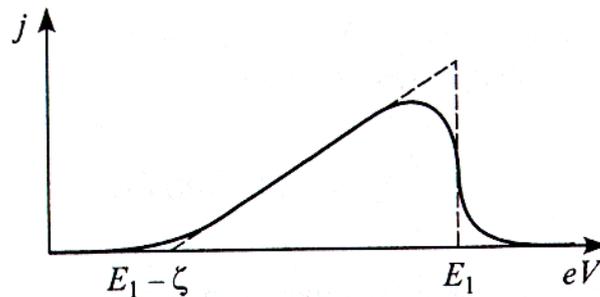


*Рис.5. Схематическое изображение структуры резонансно-туннельного транзистора на основе квантовой точки.*

Квантовая точка имеет дискретный энергетический спектр. На ее основе можно изготовить резонансно-туннельный диод, если связать ее через туннельно-прозрачные барьеры с двумя электродами. В этом случае оказывается возможным осуществить управление проводимостью структуры. Для этого необходимо иметь способ изменения размеров квантовой точки. В таком случае будет меняться положение энергетических уровней в квантовой точке – появляется принципиальная возможность «включать» и «выключать» механизм резонансного туннелирования.

Центральный верхний электрод транзистора круглой формы соединяется с нижним электродом через двухбарьерную резонансно-туннельную структуру с двумерным электронным газом в центре. Квантовая точка в этой структуре образуется с помощью третьего электрода – затвора, кольцом окружающего центральный верхний электрод. При подаче на него отрицательного потенциала электроны из области двумерного газа под затвором вытесняются к центру структуры. Таким способом под центральным электродом может быть сформирована квантовая точка, поперечные размеры которой, а, следовательно, и положение энергетических уровней в ней определяются величиной отрицательного напряжения на

затворе. Сдвиг уровней приводит к изменению условий резонансного туннелирования. Положение участков отрицательного дифференциального сопротивления в вольт-амперной характеристике между центральным и нижним электродами зависит от напряжения на затворе – такой прибор имеет более широкие функциональные возможности, чем просто резонансно-туннельный диод.



*Рис.6. ВАХ резонансно-туннельной структуры для простейшей модели (штриховая кривая) и с учетом уширения уровней (сплошная кривая).*

На работе резонансно-туннельного транзистора отрицательно сказывается наличие неконтролируемых примесей и дефектов в области квантовой точки и туннельных барьеров (рис.6). Различное положение примесных атомов в области квантовой точки для разных транзисторов приводит из-за искажений локального потенциала к значительному разбросу характеристик транзисторов. Кроме того, через электронные атомные уровни примеси тоже может происходить резонансное туннелирование – вольт-амперная характеристика транзистора будет иметь в этом случае пики, положение которых не зависит от напряжения на затворе. Но резонансно-туннельные транзисторы потребляют очень малую мощность на одно переключение – в этом их преимущество.

#### **4.Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика.**

Потребности в разработке логических устройств для нанокomпьютеров с очень высокой плотностью логических элементов и с максимально возможно низким потреблением энергии на одно переключение привели к

использованию в логических элементах проводящих островков очень малого размера – квантовых точек - отдельных кружках или изолированных плоских фигурах субмикронного размера. В таких приборах для реализации вычислений логических функций используют массивы связанных взаимодействующих квантовых точек. Эти приборы называют квантово-точечными клеточными автоматами.

Основу прибора составляет ячейка, состоящая из четырех или пяти квантовых точек. На рисунке представлена ячейка из пяти квантовых точек: четыре точки расположены в углах квадрата, а одна – в центре. В ячейку при помощи внешнего напряжения через дополнительный электрод вводятся два избыточных электрона, и ячейка приобретает электрический заряд.

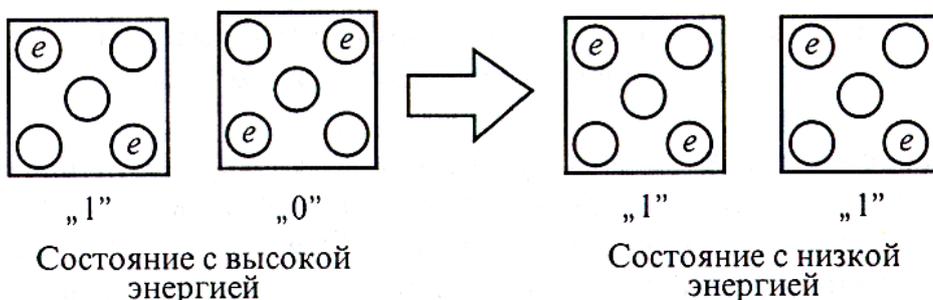
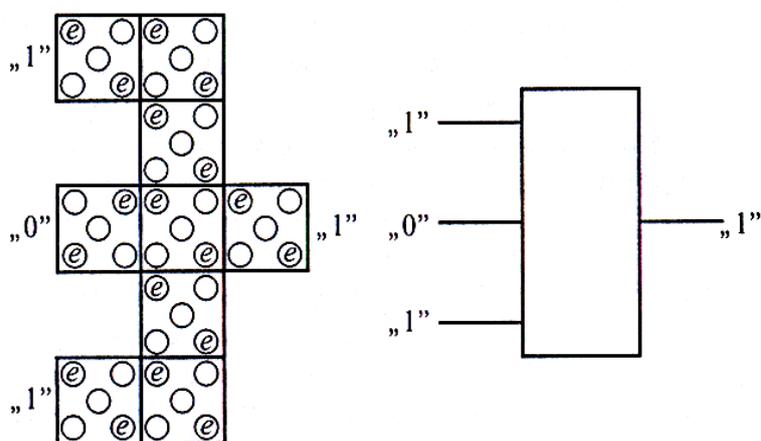


Рис. 7. Различные конфигурации ячеек квантово-точечных автоматов

Квантовые точки в ячейке располагаются таким образом, что возможно туннелирование только через центральную точку. Из-за электростатического отталкивания между избыточными электронами вся система будет иметь минимальную энергию только в том случае, если электроны расположатся как можно дальше друг от друга, т.е. в углах квадрата, соединенных диагонально. Т.к. таких возможных положений всего два, то система имеет всего два устойчивых состояния (две поляризации), и, следовательно, одно из этих состояний можно считать логической единицей («1»), а второе – логическим нулем («0»). При переходе системы из одного устойчивого состояния в другое меняются поляризация системы и распределение электрических полей вокруг ячейки. С помощью дополнительных электродов, связанных с ячейкой емкостной связью, можно навязать ячейке

необходимое состояние и перевести ее в состояние «1» или «0». Если рядом с первой ячейкой расположить вторую (в которой также находится два дополнительных электрона), то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы. Составляя комбинации из расположенных разным образом ячеек, можно реализовать разнообразные логические функции и выполнить необходимые логические преобразования и вычисления. На следующем рисунке представлен пример комбинации ячеек, при которой состояние на выходе определяется большинством состояний на входе.



*Рис.8. Комбинации ячеек квантово-точечного автомата, при которых состояние на выходе определяется большинством состояний на входе*

На основе таких элементов возможно создание нанокomпьютера. Важно отметить, что взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов вдоль цепочки – в бестоковом режиме, только за счет передачи вдоль цепочки состояния поляризации.

Преимущества логических устройств на основе квантово-точечных клеточных автоматов состоят в том, что по сравнению с аналогичными устройствами на основе полевых транзисторов требуется значительно меньший объем активной области. Например, полный сумматор на основе клеточных автоматов с размером точки 20нм можно расположить на

площади около  $1\text{ мкм}^2$ , в то время как такую же площадь занимает всего лишь один полевой транзистор. Для построения такого же сумматора на основе полевых транзисторов требуется примерно 40 транзисторов.

Вычислительный процесс в приборах на основе клеточных автоматов осуществляется при переходе всей совокупности ячеек в состояние с минимальной энергией – в основное состояние. Поскольку сложные вычислительные устройства должны содержать большое число ячеек, то состояние с минимальной энергией можно получить разными способами. Это может приводить к ошибкам в вычислениях. Также такие системы чувствительны к внешним воздействиям и поэтому требуют строгого контроля внешних условий. При повышении температуры вычислительный процесс может быть нарушен. Для ячеек, у которых размер одной квантовой точки  $\sim 20\text{ нм}$ , изменение энергии при перезарядки точки составляет величину  $\sim 1\text{ мэВ}$  (примерно  $1/20\text{ кТ}$  при комнатной температуре). Еще одна проблема, которая должна быть решена для успешной работы устройств на основе клеточных автоматов, состоит в том, что поскольку электростатическое поле ячейки влияет на соседние ячейки как в направлении выхода устройства, так и в направлении входа, то из-за случайных воздействий возможно распространение сигнала не только от входа к выходу, но и наоборот. Для устранения этого недостатка предложены устройства на основе квантовых точек, у которых направление передачи сигнала определяется внешним электрическим полем. Практическое изготовление устройств на основе клеточных автоматов находится в самой начальной стадии и требует разрешения целого ряда проблем, в основном технологических.

## ЗАДАНИЕ

1) Снять семейство статических стоковых характеристик полевого транзистора  $I_c=I_c(V_c)$  при  $V_3=const$ . Определить по ним внутреннее (дифференциальное) сопротивление в режиме насыщения

$$R_i = \frac{\partial V_c}{\partial I_c} \approx \left( \frac{\Delta V_{CH}}{\Delta I_{CH}} \right)_{V_3=const}. \quad (19)$$

При  $V_3 = 0$  найти ток насыщения  $I_{cн}^0$  и напряжение отсечки  $|V_{om}| = |V_{cн}^0|$ .

2) Измерить статическую стоко-затворную характеристику (характеристику управления)  $I_c=I_c(V_3)$  при  $V_c=const$ .

Используя приближенное соотношение  $V_{om}=1,46V_3^*$ , где  $V_3^*$  соответствует току  $I_c=0,1I_{cн}^0$  (рис. 4), определить напряжение отсечки и сравнить его с полученным в п.1. Вычислить крутизну  $S \approx \left( \frac{\Delta I_c}{\Delta V_3} \right)$ , используя конечные приращения  $\Delta I_c$  и  $\Delta V_3$  на характеристике управления.

3) Измерить частотные характеристики полевого транзистора при различных значениях сопротивления нагрузки  $R_n$  и внутреннего сопротивления генератора  $R_g$ .

Более подробные указания по выполнению работы содержатся в отдельной папке «МДП транзистор».

## Список рекомендуемой литературы

1. Сугано Т., Икома Т., Такэиси Е. Введение в микроэлектронику, М., 1988.
2. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Парфенов В.В., Закиров Р.Х. Физика полупроводников: Методич. пособие к практикуму по физике твердого тела. Казань: Изд-во КГУ, 2001.
4. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем, СПб, Наука, 2001.
5. Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В. Физика полупроводниковых приборов: Методич. пособие к практикуму по физике твердого тела. Казань: Изд-во КГУ, 2004.
6. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники, СПб, 2003.