

Петрозаводский государственный университет

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛЕВОГО МДП ТРАНЗИСТОРА**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов 4 курса физико-технического факультета
специальности “Твердотельная электроника и микроэлектроника”

Петрозаводск

Издательство Петрозаводского государственного университета

2003

Рассмотрены и рекомендованы к печати на заседании
редакционной комиссии по отрасли науки и техники “физика”
марта 2003г.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета
Петрозаводского государственного университета

Составители: Ю.Е. Гардин, В.А. Гуртов, С.Н. Кузнецов, В.Б. Пикулев

1.1. *Краткие сведения о работе полевых транзисторов.*

Полевые транзисторы со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП-транзисторы) относятся к числу униполярных полупроводниковых приборов. Основная структура МОП-транзистора показана на рис. 1. Для конкретности будем рассматривать случай *n*-канального МОП-транзистора. Транзистор состоит из полупроводниковой подложки *p*-типа, в которой сформированы две высоколегированные *n*⁺-области - сток и исток. Металлический электрод, отделенный от подложки слоем окисла, называется затвором. Структура транзистора характеризуется длиной и шириной канала, толщиной слоя диэлектрика, уровнем легирования подложки.

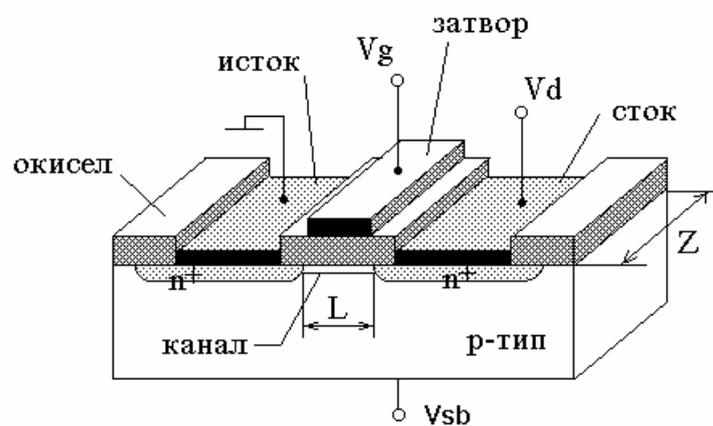


Рис. 1. Схема структуры МОП-транзистора.

Физической основой работы МОП-транзистора является эффект поля. Эффект поля состоит в том, что под действием внешнего электрического поля изменяются как концентрация, так и тип свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника. В МОП-транзисторе внешнее поле обусловлено приложенным напряжением к затвору. Когда напряжение на затворе отсутствует, электрическая цепь исток-сток представляет собой два *n-p*-перехода, включенных навстречу друг другу. Проводимость цепи практически равна нулю. Если к затвору приложено достаточно большое положительное напряжение, у границы с диэлектриком образуется инверсионный канал, соединяющий *n*⁺-области стока и истока. Проводимость этого инверсионного канала модулируется изменением напряжения на затворе. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения присутствуют четыре состояния области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника - обогащение, обеднение, слабая и сильная инверсия. МОП-транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии.

Рассмотрим качественно работу МОП-транзистора. Будем считать, что напряжение на затворе структуры достаточно для сильной инверсии на границе с окислом. Тогда, если напряжение на стоке V_D не слишком велико, инверсионный слой проявляется как обычное сопротивление, и ток I_D через проводящий инверсионный канал будет увеличиваться пропорционально напряжению стока V_D . Эта область называется линейной областью работы прибора. С увеличением напряжения на стоке достигается момент, когда заряд инверсионного слоя Q_n на границе у стока становится равным нулю. Эти условия соответствуют началу режима отсечки канала. Напряжение стока в данном режиме называется напряжением отсечки (V_D). При больших напряжениях точка отсечки сдвигается к истоку, а ток стока при этом увеличивается лишь незначительно, поскольку напряжение между истоком и точкой отсечки канала по-прежнему равно V_D .

Теперь выведем аналитические соотношения, определяющие основные характеристики МОП-транзистора, изображенного на рис. 1, используя при этом следующие допущения: 1) подзатворная область представляет собой идеальную МОП-структуру, что означает отсутствие поверхностных состояний, фиксированного заряда в окисле, разности работ выхода между полупроводником и металлом; 2) учитывается только дрейфовая компонента тока; 3) подвижность носителей в инверсионном слое постоянна (не зависит от электрического поля); 4) концентрация легирующей примеси в канале однородна; 5) обратные токи утечки $p-n^+$ -переходов пренебрежимо малы.

Оси координат направим: z вглубь полупроводника, y - вдоль по длине канала и x - по ширине канала. В соответствии с принятыми допущениями поверхностная плотность полного заряда в полупроводнике на расстоянии y от истока и поверхностный потенциал $\psi_S(y)$ в той же точке связаны следующим соотношением:

$$Q_S(y) = [-V_G + \psi_S(y)] C_{OX} \quad (1)$$

где $C_{OX} = \epsilon_{OX}/d$ - удельная емкость окисла. В режиме сильной инверсии полный поверхностный заряд можно представить в виде

$$Q_S = Q_n + Q_B, \quad (2)$$

т.е. заряд на поверхности Q_S уравнивается суммой зарядов свободных электронов Q_n и ионизованных акцепторов Q_B . Используя выражение (2) для заряда инверсионного слоя получим

$$Q_n(y) = Q_S(y) - Q_B(y) = [-V_G - \psi_S(y)] C_{OX} - Q_B(y) \quad (3)$$

В режиме сильной инверсии поверхностный потенциал ψ_S равен $2\psi_{S0} + V(y)$, где ψ_{S0} - величина поверхностного потенциала в равновесных условиях ($V_D=0$), $V(y)$ - напряжение

обратного смещения в точке y по отношению к потенциалу истока. Заряд обедненного слоя равен

$$Q_B(y) = -qN_A W_M = -\sqrt{2\varepsilon_s q N_A [V(y) + 2\psi_{so}]} \quad (4)$$

Подставив все в выражение (3), получим

$$Q_n(y) = -[V_G - V(y) - 2\psi_{so}]C_{ox} + \sqrt{2\varepsilon_s q N_A [V(y) + 2\psi_{so}]} \quad (5)$$

Проводимость канала представляет собой интеграл

$$g = \frac{Z}{L} \int_0^{x_i} \sigma(x) dx \quad (6)$$

от объемной удельной проводимости $\sigma(x) = qn(x)\mu_n(x)$. Полагая, что подвижность μ не зависит от x , получим

$$g = \frac{qZ\mu_n}{L} \int_0^{x_i} n(x) dx = qZ\mu_n |Q_n|/L \quad (7)$$

Сопротивление элементарного участка канала длиной dy есть

$$dR = \frac{dy}{gL} = \frac{dy}{Z\mu_n |Q_n(y)|} \quad (8)$$

и, следовательно, падение напряжения на этом участке

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dy}{Z\mu_n |Q(y)|} \quad (9)$$

Умножив выражение (5) на выражение (9) и проинтегрировав получившееся выражение от истока ($y=0, V=0$) до стока ($y=L, V=V_D$), для рассматриваемого идеализированного случая найдем

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left\{ \left(V_G - 2\psi_{so} - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} \left[(V_D + 2\psi_{so})^{3/2} - (2\psi_{so})^{3/2} \right] \right\} \quad (10)$$

Из полученного выражения следует, что при фиксированном напряжении на затворе V_G ток стока I_D сначала линейно увеличивается с напряжением стока (линейная область), затем крутизна характеристики плавно уменьшается до нуля, после чего начинается область насыщения. Зависимости тока стока I_D от напряжения на затворе V_G называются переходными характеристиками или передаточными, а зависимость тока стока I_D от напряжения на стоке V_D - проходными или выходными характеристиками транзистора.

Рассмотрим подробно две области работы МОП-транзистора. Для малых напряжений стока ($V_D \ll (V_G - V_T)$), разлагая выражение (10), получим

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T) V_D \quad (11)$$

где $V_T = 2\psi_{so} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_{so})}}{C_{ox}}$ - пороговое напряжение.

По мере увеличения напряжения стока V_D заряд инверсионного слоя Q_n в точке у края стока уменьшается и становится равным нулю при $V_D=V_{DS}$. Это явление называется отсечкой канала. При $V_D=V_{DS}$ ток стока достигает максимального значения I_{DS} . При больших напряжениях ($V_D > V_{DS}$) наступает насыщение ($I_D=I_{DS}$). Величина напряжения отсечки V_{DS} находится из следующего выражения

$$V_{DS} = V_G - 2\psi_{so} + K^2 \left(1 - \sqrt{1 + 2V_G / K^2}\right) \quad (12)$$

где $K = \sqrt{\varepsilon_s q N_A} / C_{ox}$.

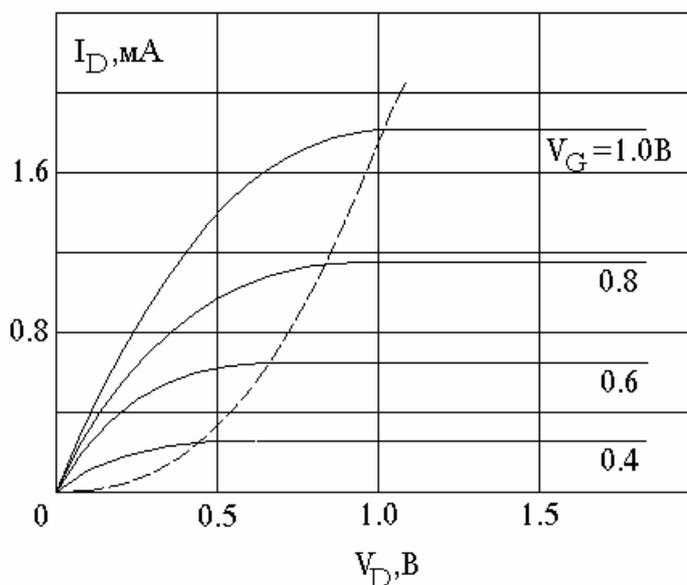


Рис. 2. Выходные характеристики идеального МОП-транзистора.

На рис. 2. приведены теоретические выходные характеристики МОП-транзистора.

Штриховая линия соединяет точки начала насыщения на характеристиках, соответствующих различным смещениям на затворе транзистора.

1.2. Физические ограничения в МОП-транзисторах.

Отличие характеристик реальных МОП-транзисторов от случая идеального транзистора обусловлено существованием поверхностных состояний (ПС) и заряда в окисле.

1. Заряд Q_{it} , захваченный поверхностными состояниями, которые локализованы на границе раздела полупроводник-диэлектрик и энергия которых лежит в глубине запрещенной зоны полупроводника. Эти поверхностные состояния, называемые также гранич-

ными, могут достаточно быстро перезаряжаться, обмениваясь электронами (дырками) с полупроводником.

2. Фиксированный заряд окисла Q_f , расположенный в окисле или в непосредственной близости от границы раздела.

Поскольку энергетические уровни состояний, захватывающих поверхностный заряд Q_{it} , непрерывно распределены в запрещенной зоне полупроводника, вводится понятие энергетической плотности поверхностных состояний:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (13)$$

Одной из причин возникновения поверхностных состояний в запрещенной зоне полупроводника заключается в том, что сама граница раздела является нарушением пространственной периодичности кристаллической решетки; вторая причина связывается с возникновением переходного нарушенного слоя при соединении граничащих фаз.

Влияние поверхностных состояний и заряда в окисле на характеристики реального транзистора проявляется в следующих чертах. Во-первых, пороговое напряжение V_T не будет равно расчетному потенциалу сильной инверсии $2\psi_{s0}$, этому также способствует наличие разности работ выхода материалов канала и затвора. Во-вторых, наклон подпороговой области передаточной характеристики будет больше идеального. Наконец, ток насыщения открытого канала (для данного V_{SD}) будет меньше из-за дополнительного рассеяния носителей на граничных состояниях.

Методы определения параметров МОП-транзисторов.

Из основных характеристик транзистора можно определять параметры полупроводниковой подложки, диэлектрика и самого транзистора. Длина канала L и ширина Z являются конструктивными параметрами транзистора. Удельную емкость подзатворного диэлектрика C_{OX} , а следовательно, и его толщину находят, например, из измерения емкости затвора в режиме обогащения. Величину порогового напряжения V_T и подвижность носителей μ_n можно рассчитать как из характеристик в линейной области, так и из характеристик в области отсечки. Экстраполяция участка выходной ВАХ в линейной области $I_D(V_D)$ к значению $I_D=0$ соответствует

$$V_G(I_D \rightarrow 0) = V_T + V_D/2 \quad (14)$$

Тангенс угла наклона $\text{tg } \alpha$ передаточной ВАХ $I_D(V_G)$ определяет величину подвижности μ_n (при $V_G > V_T$)

$$\mu_n = \frac{L \cdot \operatorname{tg} \alpha}{Z C_{\text{ox}} V_D} \quad (15)$$

Таким образом, из статических ВАХ МОП-транзистора можно рассчитать большое количество параметров, характеризующих полупроводник диэлектрик и границу раздела между ними.

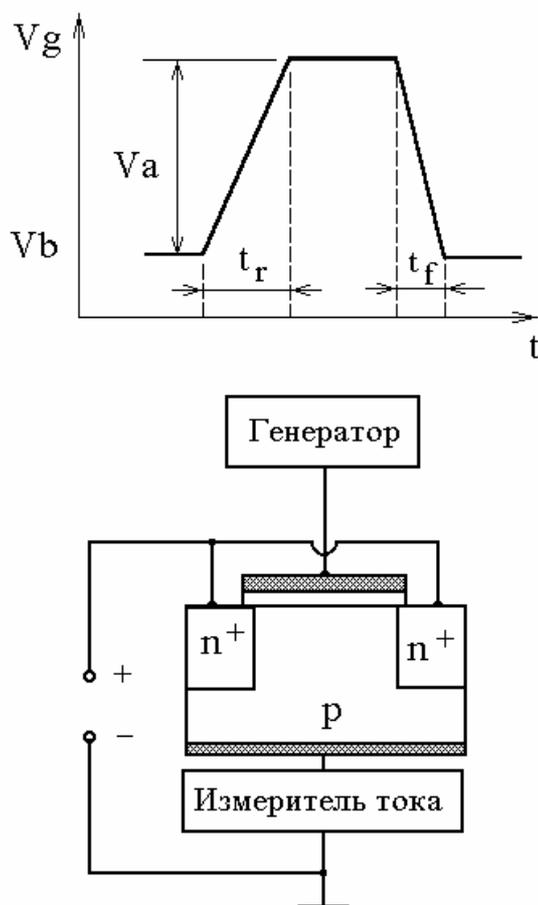


Рис. 3. Упрощенная схема для измерения кривой тока зарядовой накачки.

Для измерения параметров ПС в транзисторных структурах используются динамические методы исследования. Наиболее точным является метод зарядовой накачки (СР). Этот метод позволяет получить информацию о средней по энергии плотности ПС, а также об энергетическом распределении состояний в запрещенной зоне полупроводника.

Затвор МДП-транзистора подключен к генератору, к системе сток-исток приложено обратное смещение по отношению к подложке (рис.3). Генератор вырабатывает возбуждающие импульсы (обычно трапецеидальной формы) определенной амплитуды V_A с определенным смещением (пьедесталом) V_B . Снимается зависимость тока подложки как функция приложенного к затвору напряжения пьедестала импульса V_B . Этот ток вызван циклической рекомбинацией на межфазных ловушках (ПС) неосновных носителей, ин-

жектурируемых истоком и стоком, и основных носителей, идущих из подложки при переключении транзистора из режима инверсии в режим обогащения.

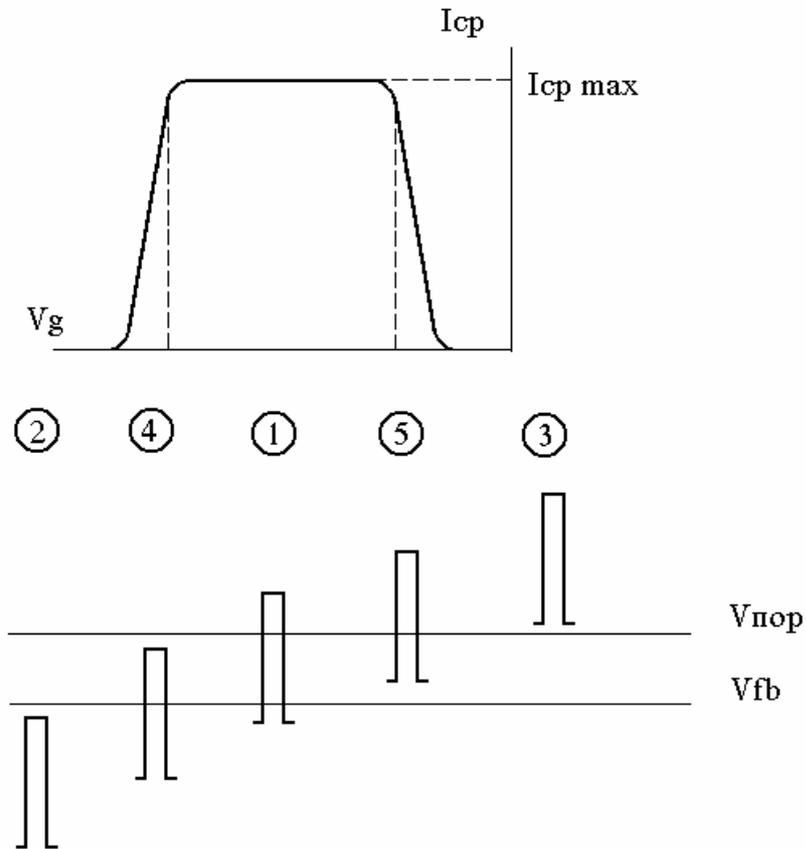


Рис. 4. Кривая тока зарядовой накачки.

Согласно теории Шокли-Рида ток зарядовой накачки будет прямо пропорционален плотности ПС, площади затвора и частоте импульсов. Амплитуду, частоту, времена нарастания и спада фронтов во время измерения сохраняют постоянными. Полученная зависимость тока подложки от приложенного к затвору напряжения пьедестала приведена на рис. 4. На ней можно выделить пять характерных областей. Область 1 соответствует явно выраженному эффекту зарядовой накачки, когда уровень пьедестала импульса меньше напряжения плоских зон, а вершина импульса выше порогового напряжения. При таких условиях ток зарядовой накачки достигает максимального значения. Ток зарядовой накачки, измеренный в цепи подложки, будет определяться следующим образом

$$I_{cp} = 2q\overline{D}_{it}fS_GkT \quad (16)$$

где \overline{D}_{it} - средняя плотность ПС по каналу,

S_G - площадь затвора, f - частота импульсов.

На участках 2 и 3 ток зарядовой накачки равен нулю. На участке 2 уровни пьедестала и вершины импульса меньше напряжения плоских зон, т.е. транзистор всегда нахо-

дится в режиме обогащения, поэтому ПС заполнены дырками. На участке 3 наоборот, канал постоянно открыт, и нет дырок достигающих поверхности. В обоих случаях величина тока подложки состоит только из токов утечки истока и стока. На участках 4 и 5 величина тока зарядовой накачки будет определяться рекомбинационными процессами при слабой инверсии.

Блок-схема и описание работы измерительной установки.

Блок-схема установки для измерения параметров МДП транзистора приведена на рис.4. Она состоит из устройства измерения тока, устройства формирования постоянных напряжений и устройства генерации сигнала специальной формы цифровым методом. Все устройства объединены общей шиной данных/управления и связаны через интерфейсную плату с персональной ЭВМ типа IBM PC по шине ISA.

Устройство формирования постоянных напряжений состоит из регистров, в которых хранятся цифровые коды генерируемых напряжений и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), которые вырабатывают эти напряжения. Первоначально, цифровой код, через программируемый порт ввода/вывода, выставляется на внутреннюю шину данных прибора. При подаче разрешающего сигнала на управляющие линии происходит запись кода в соответствующий регистр. Появившийся на выходе регистра код преобразуется цифро-аналоговым преобразователем в постоянное напряжение. ЦАП1 используется для генерации напряжения затвора (и пьедестала импульса в режиме СР), ЦАП2 и ЦАП3 для формирования напряжений стока и подложки соответственно.

Для генерации импульсного воздействующего напряжения для режима СР используется цифровой метод. Он позволяет получить сигнал любой формы в широком диапазоне частоты повторения. Информация о форме сигнала записывается и хранится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). При записи информации в ОЗУ генерация адреса ячейки и байта данных осуществляется по внутренней шине данных/управления. При работе в СР режиме чтение из ОЗУ тактируется с помощью внутреннего тактового генератора через программируемый делитель частоты. Считанная информация поступает на быстродействующий ЦАП4, где преобразуется в аналоговый сигнал. Полученный сигнал поступает на суммирующий усилитель, где он накладывается на постоянное смещение, генерируемое с помощью ЦАП1. На выходе усилителя получается импульс заданной формы с заданным смещением. Цифровой метод формирования импульсного воздействующего напряжения обеспечивает универсальность и гибкость измерительной системы.

Для измерения тока применяется электрометрический преобразователь сопротивлений, выходное напряжение которого кодируется в последовательность стандартных им-

пульсов (т.е. в частоту). Полный диапазон измеряемых токов в объекте от 1 пА до 1 мА разбит на 4 интервала, выбор каждого из них осуществляется программно.

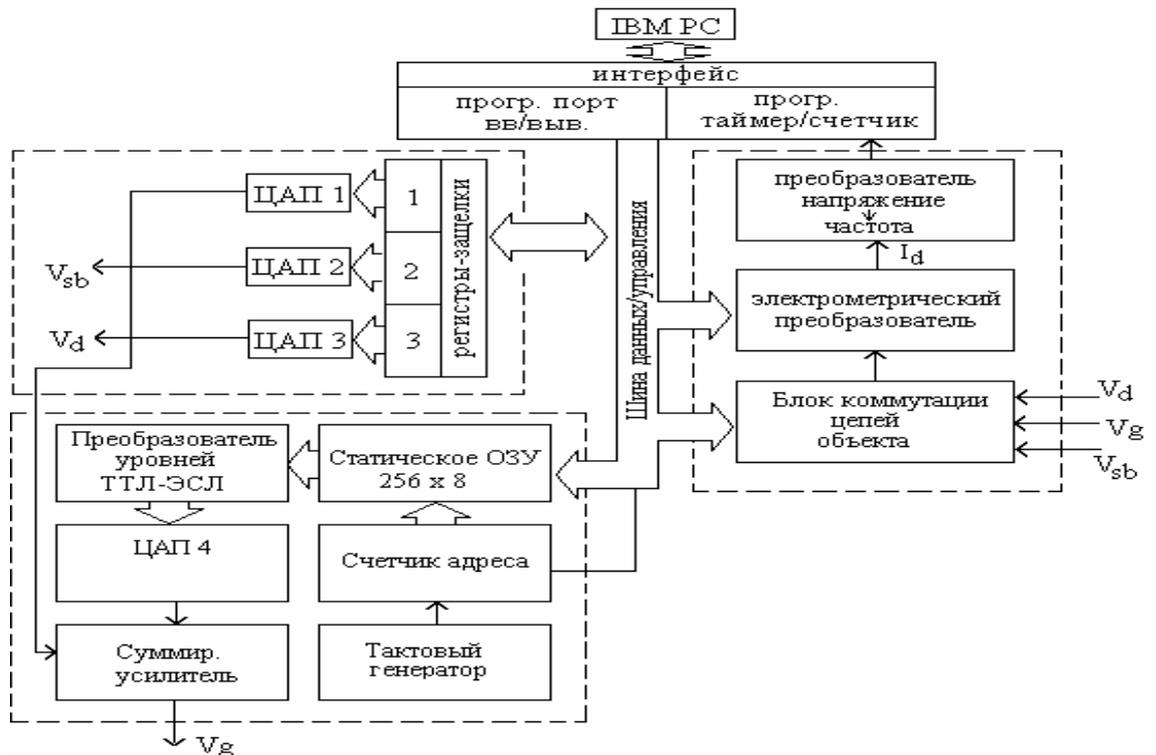


Рис. 4. Блок-схема измерителя параметров МОП транзисторов

Режим измерения (т.е. тип регистрируемой ВАХ) задается программно, с помощью входного блока коммутации выводов МДП транзистора. Измеряемый объект размещается непосредственно в корпусе измерительной установки для уменьшения внешних наводок.

Структура управляющей программы и пользовательский интерфейс.

Программа управления измерителем характеристик полевых транзисторов организована как многодокументное приложение, управляемое из главного диалогового окна (рис.4). Из главного окна могут быть запущены: (1) модули проведения измерений (измерение выходных и передаточных характеристик полевого транзистора и измерение токов по методу зарядовой накачки); (2) интерактивная подсказка, указывающая на то, какие дальнейшие действия должен осуществить пользователь; (3) модуль математических расчетов, обрабатывающий результаты измерений; (4) модуль-интерфейс к среде моделирования элементов интегральных схем Microtec™, который организует управление группами параметров и ввод значений параметров для запуска расчетных программ Microtec™; (5) модуль графического вывода, визуализирующий серии экспериментальных и расчетных кривых.

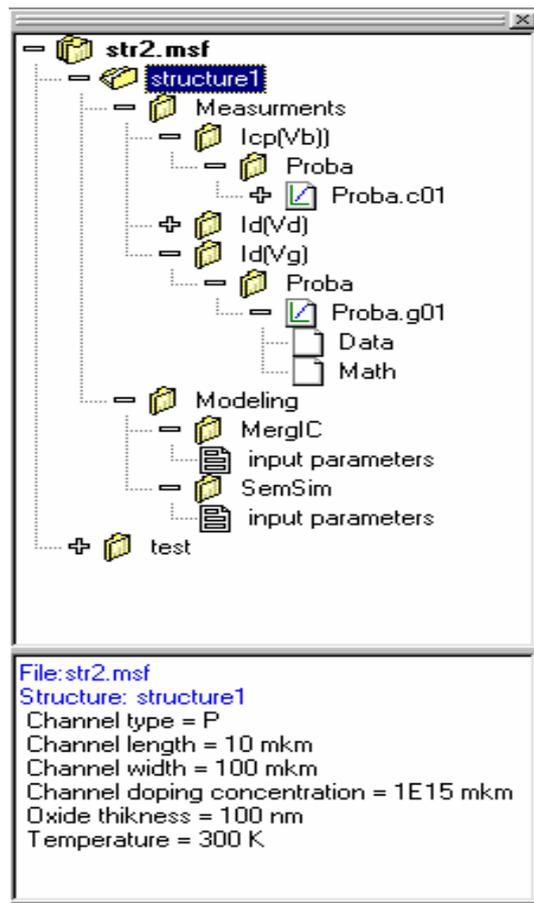


Рис.5. Иерархическая структура главного окна процедур и данных.

1. Измерения передаточной и выходной ВАХ.

Используются следующие входные параметры: тип канала; начало, конец, грубый и точный шаг по диапазону изменения напряжения на затворе (V_g); текущее значение напряжений на стоке (V_d) и подложке (V_{sb}). Если снимается серия кривых, один из двух последних параметров может варьироваться, а в измерительную процедуру попадает его текущее значение. Конечным результатом, в случае отсутствия ошибок измерения или выхода по прерыванию, является двумерный массив данных серии зависимостей $I_d(V_g)$. При измерении передаточных характеристик первоначально идет измерение I_d с заданным грубым шагом вдоль выбранного диапазона по V_g . Затем следует режим уточнения значений тока стока в области его резкого изменения (вблизи порогового напряжения) с точным значением шага по V_g , так как в последствии основные расчетные алгоритмы будут оперировать именно с этой областью.

В алгоритме измерения выходной ВАХ используется одно заданное значение шага по V_d , и вследствие этого отсутствует процедура сортировки и удаления совпадающих точек.

2. Измерение кривой зарядовой накачки.

Используются следующие исходные данные: тип канала, значение напряжения обратного смещения V_r , начало, конец, грубый и точный шаг по диапазону V_b . Конечным результатом является получение одиночной кривой $I_{cp}(V_b)$.

Процедура измерения кривых зарядовой накачки включает в себя несколько этапов:

- 1) обзорный режим (поиск области существования тока зарядовой накачки);
- 2) уточнение границ найденной области (движение по V_b с уменьшенным шагом в двух поддиапазонах нарастания и спада тока I_{cp});
- 3) измерение частотной зависимости в максимуме I_{cp} (при различных значениях частоты пилообразного напряжения, подаваемого на структуру в этом режиме). Значение амплитуды пилообразного напряжения (V_a) зафиксировано.

Расчет параметров транзистора по данным измерений

Совокупность расчетных процедур оформлена как отдельный модуль программы и позволяет осуществлять обработку файлов данных передаточных характеристик и данных метода зарядовой накачки. Набор параметров, для которых должен производиться расчет, определяет пользователь из предложенного списка.

К числу рассчитываемых параметров относятся:

- 1). Пороговое напряжение V_T ;
- 2). Обратный наклон подпороговой характеристики $S = \frac{dV_g}{d(\lg I_d)}$;
- 3). Крутизна передаточной характеристики $g_m = \max\left(\frac{dI_d}{dV_g}\right)$, $V_g \geq V_T$;
- 4). Эффективная подвижность носителей в канале транзистора $\mu_{eff} = \frac{g_m}{C_{ox} V_d}$;
- 5). Напряжение плоских зон V_{fb} ;
- 6). Величина средней плотности граничных состояний \bar{D}_{it} .

Величина V_T может быть найдена как из передаточной характеристики, так и из кривой зарядовой накачки. В программе используются оба способа. В первом случае выбирается надпороговая область на кривой $I_d(V_g)$, которая была измерена с минимальным шагом. В этой области строится последовательность аппроксимирующих прямых для заданного количества точек в координатах $\sqrt{I_d}(V_g)$. Число таких прямых определяется общим количеством точек в анализируемой области, интервалом выборки для аппроксимации и шагом, с которым следуют выборки. Из полученных прямых выбирается та, которая имеет минимальное

среднеквадратичное отклонение. Экстраполяция выбранной прямой к значению $I_d=0$ дает искомую величину V_T .

В случае расчета порогового напряжения из кривых зарядовой накачки в соответствии с теоретическими основами метода одна из границ области возрастания I_{cp} определяет V_T , другая - V_{fb} .

Расчет обратного наклона, крутизны и эффективной подвижности носителей заряда проводится по данным передаточной характеристики. В первом случае, с помощью прямой аппроксимируются все точки передаточной характеристики, полученные при уточняющих измерениях. Аппроксимация ведется в координатах $\lg I_d(V_g)$ для области $V_g \leq V_t$, далее находится тангенс угла наклона этой прямой. В формуле для расчета эффективной подвижности используются априорные данные об исследуемом транзисторе для расчета C_{ox} :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{cx} S_g}{d_{ox}}$$

, где S_g - площадь затвора, $S_g=LW$ (L - длина, W - ширина канала МДП-транзистора); d_{ox} - толщина подзатворного диэлектрика.

Средняя плотность граничных состояний определяется по зависимости тока зарядовой накачки в максимуме CP - характеристики от частоты тестирующего сигнала. Расчетное соотношение таково :

$$\langle D_{it} \rangle = \frac{I_{cp}^{max}}{2qS_g kTf (\ln f_0 - \ln f)}$$

где q - заряд электрона; k - постоянная Больцмана; T - температура; S_g - площадь затвора; I_{cp}^{max} - максимальное значение тока зарядовой накачки, измеренное при частоте f (в нашем случае $f = f_{min}$); f_0 - характеристическая частота, определяемая из пересечения прямой $\frac{I_{cp}^{max}}{f}(\ln f)$ с осью частот, прямая строится как аппроксимация измеренных экспериментальных значений $I_{cp}^{max}(f)$.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Познакомиться с методами измерения статических и динамических характеристик МОП транзистора и процедурами извлечения важнейших электрофизических параметров.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Включить выносной блок измерителя в сеть нажатием кнопки на задней панели. Должна загореться лампа подсветки кнопки.
2. Включить управляющий компьютер и загрузить операционную систему Windows. Запустить управляющую программу MOSFET с рабочего стола компьютера.

3. Открыть основное меню программы. Изучить структуру специализированных окон программы, последовательно вызывая их из главного окна. Освоить технику ввода параметров измерительных процедур.
4. Запустить процедуру измерения передаточной ВАХ транзистора. По завершении цикла, вывести измеренную кривую на дисплей. Пользуясь возможностями графики, пронаблюдать характерные участки ВАХ (подпороговый, квадратичный и насыщения).
5. Запустить процедуру измерения выходной ВАХ при затворном напряжении, на ~ 1 вольт превышающем пороговое (см. предыдущий пункт). После измерения, вывести кривую на дисплей и пронаблюдать участки линейного роста и насыщения.
6. Вызвать процедуру измерения зарядовой накачки, задать интервал сканирования напряжения пьедестала таким образом, чтобы он простирался от области закрытого канала до области насыщения. Величину обратносмещающего напряжения установить в интервале 0.2-0.5 вольт. Затем вывести измеренную кривую зарядовой накачки на монитор, провести качественное сравнение порогового напряжения транзистора, полученного данным способом и из передаточной ВАХ.
7. Зайти в процедуру извлечения базовых параметров МОП транзистора и запустить ее исполнение. Последовательно проходя все пункты меню, получить искомые параметры. Перенести их в лабораторный журнал для подготовки отчета.
8. Распечатать на принтере измеренные ВАХ для последующего представления в отчете. При необходимости, скопировать файлы проекта на дискету.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект поля и каковы особенности его использования в работе МОП транзистора?
2. Сформулируйте посылки одномерной модели транзистора с плавным каналом и дайте вывод выражений для ВАХ.
3. В чем состоят отличия реального транзистора от идеализированной модели? Поясните ключевые моменты метода зарядовой накачки для характеристики совершенства границы раздела полупроводник-диэлектрик в транзисторной структуре.

Рекомендуемая литература

1. Гуртов В.А. Полевые транзисторы со структурой МДП // Петрозаводск. 1987. 58 стр.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, т.2 // Москва «Мир». 1984 г.
3. Heremans P., Witters J., Groeseneken G., Maes H.E. Analysis Of charge pumping Technique And Its Application For MOSFET Degradation // IEEE Trans. On Elect. Devices. 1989. V.36. №7. P.1318-1335.