

1.4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР МЕТАЛЛ — ДИЭЛЕКТРИК — ПОЛУПРОВОДНИК

В последние годы разработано и производится много разновидностей приборов, в основу которых положен эффект поля. Наибольшее распространение получили приборы со структурой металл — диэлектрик — полупроводник (МДП).

Полевыми (униполярными) транзисторами называются полупроводниковые приборы, работа которых основана на управлении размерами токопроводящей области (канала) посредством изменения напряженности поперечного электрического поля. Проводимость канала в таких приборах определяется основными носителями заряда.

В настоящее время известны две разновидности полевых транзисторов: транзисторы с управляющими p — n -переходами и МДП транзисторы.

ТЕОРИЯ

1.4.1. УСТРОЙСТВО МДП ТРАНЗИСТОРА

На рис. 1.35 схематически показано устройство МДП транзистора с каналом p -типа. В подложке из кремния n -типа путем диффузии создаются две сильнолегированные p -области. Одна из этих областей, от которой начинают движение основные носители

в канале, называется истоком; другая область, к которой движутся основные носители, называется стоком. На поверхности кремния между стоком и истоком расположен тонкий слой диэлектрика, нанесенного тем или иным технологическим способом. Эта область называется затвором и является управляющим электродом. Так как диэлектрик обладает хорошими изолирующими свойствами, то МДП транзистор часто называют транзистором с изолирован-

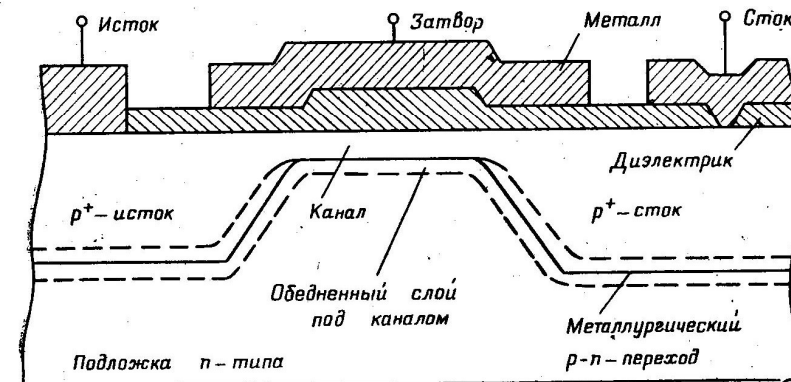


Рис. 1.35. Устройство МДП транзистора с каналом p -типа

ным затвором. В качестве диэлектрика в МДП транзисторе используют SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 и другие материалы. Однако наибольшее применение в качестве материала затвора нашла двуокись кремния SiO_2 . МДП транзистор с диэлектриком из окиси исходной полупроводниковой пластины называется МОП транзистором (металл — окисел — полупроводник).

МДП транзисторы делятся на два вида: транзисторы с встроенными каналами и транзисторы с индуцированными каналами (рис. 1.36). В транзисторах с встроенными каналами канал между стоком и истоком создается технологическим путем. В транзисторах с индуцированными каналами канал наводится (индуцируется) под действием управляющего напряжения. Транзисторы с встроенными каналами могут работать в режимах обогащения и обеднения канала основными носителями, а транзисторы с индуцированными каналами работают только в режиме обогащения.

По типу проводимости каналов различают МДП транзисторы с каналами n - и p -типов. Исходный полупроводниковый материал, на котором изготавливается транзистор, называется подложкой.

В отличие от биполярных транзисторов в полевых транзисторах ток в канале переносится основными носителями. Входное сопротивление полевых транзисторов превосходит входное сопротивление биполярных транзисторов и для МДП транзистора составляет 10^{10} — 10^{14} Ом. Так как входные токи полевых транзисторов малы, то управление изменением тока в выходной цепи осу-

ществляется входным напряжением. Поэтому усилительные свойства полевого транзистора, как и вакуумных ламп, характеризуются крутизной, а не коэффициентом передачи тока, как это имеет место в биполярных транзисторах. Крутизна полевых тран-

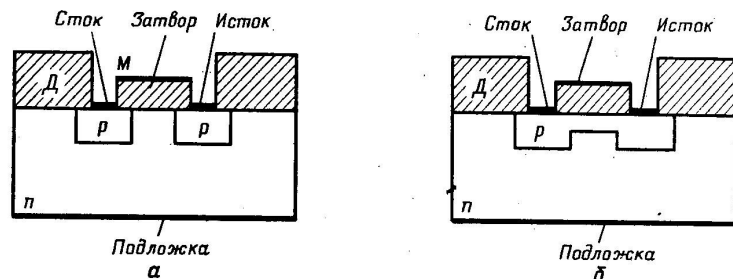


Рис. 1.36. Типовые структуры полевых транзисторов: а) МДП транзистор с индуцированным каналом; б) МДП транзистор с встроенным каналом: Д — диэлектрик; М — металл; П — полупроводник

зисторов для большинства практических применений может считаться частотно-независимым параметром. В связи с этим быстрое действие электронных схем на полевых транзисторах ограничено в основном паразитными параметрами схемы.

1.4.2. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ МДП ТРАНЗИСТОРА

В зависимости от величины и знака эффекта поля в МДП транзисторе возможно осуществление трех основных режимов работы: обогащения, обеднения и инверсии. В соответствии с этими режимами плотность поверхностного заряда может быть больше аналогичной величины для подложки, меньше этой величины или иметь противоположный по сравнению с подложкой тип проводимости. Зонные диаграммы для всех этих случаев аналогичны диаграммам, приведенным на рис. 1.30.

В отсутствие напряжения, приложенного к структуре, $p-n$ -переходы, образованные областями стока, истока и подложкой, смещены в обратном направлении. В подложке на границе раздела между полупроводником и диэлектриком образуется отрицательный заряд подвижных электронов, который уравнивает положительный заряд Q_{ss} поверхностных состояний. Наличие избыточных электронов у поверхности раздела приводит к искривлению здесь энергетических зон.

Дополнительное искривление зон и накопление отрицательного заряда подвижных электронов у поверхности возникают за счет разности работ выхода для диэлектрика и полупроводника. Разность работ выхода между металлом и полупроводником не оказывает существенного влияния на образование отрицательного

заряда на границе между подложкой и диэлектриком, так как при толщине диэлектрика 1000—2000 Å напряженность электрического поля между металлом (Al) и полупроводником (Si) оказывается пренебрежимо малой. Работа выхода из SiO_2 меньше, чем работа выхода из Si. Поэтому между диэлектриком и полупроводником возникает контактная разность потенциалов фмдп, величина которой составляет приблизительно 0,4 В.

Таким образом, в исходном состоянии суммарный отрицательный заряд электронов у поверхности полупроводника обусловлен зарядом поверхностных состояний и разностью работ выхода диэлектрика и полупроводника. Из условия электронейтральности следует, что суммарный положительный заряд в диэлектрике будет равен отрицательному заряду подвижных электронов у поверхности. Поэтому электрическое поле сосредоточено на границе раздела полупроводника и диэлектрика. Основной объем полупроводника остается квазинейтральным, и можно считать, что электрическое поле в нем отсутствует.

При подаче отрицательного напряжения на затвор возникающее электрическое поле, обусловленное контактной разностью потенциалов $V_{\text{мдп}}$ и Q_{ss} , приводит к уменьшению заряда подвижных электронов у поверхности. Под действием электрического поля электроны перемещаются в глубь полупроводника. При этом происходит уменьшение изгиба зон у поверхности. С увеличением отрицательного напряжения на затворе заряд подвижных электронов у поверхности уменьшается и поверхностный слой полупроводника стремится изменить свой тип проводимости с электронного на дырочный. При определенном напряжении на затворе поверхностный слой имеет собственную проводимость и уровень Ферми совпадает с серединой запрещенной зоны. Дальнейшее увеличение отрицательного напряжения на затворе приводит к тому, что электроны, связанные с атомами донорной примеси в подложке, отталкиваются в глубь полупроводника, оголяя положительно заряженные ионизированные атомы донорной примеси. Неподвижные ионизированные атомы образуют слой объемного заряда, компенсирующий отрицательный заряд на затворе. Толщина слоя объемного заряда с ростом отрицательного напряжения на затворе изменяется незначительно, так как за счет увеличения напряженности электрического поля подвижные дырки — неосновные носители в подложке n -типа — перемещаются к поверхности и образуют инверсионный слой дырочной проводимости.

Таким образом, на поверхности полупроводника индуцируется канал, проводимость которого будет увеличиваться с ростом отрицательного напряжения на затворе. Канал транзистора изолирован от основного объема подложки высокоомным слоем объемного заряда. Поэтому если на подложке изготавливается несколько транзисторов, то их взаимным влиянием можно пренебречь.

При рассмотрении образования канала предполагалось, что

из подвижных электронов. В действительности же там имеются и дырки, которые компенсируют часть электронного заряда. По мере увеличения отрицательного напряжения на затворе доля дырок и ионизированных атомов донорной примеси возрастает, а доля электронов уменьшается. Заметная проводимость между стоком и истоком появляется тогда, когда заряд дырок превысит заряд электронов и ионизированных атомов донорной примеси.

Определим потенциал на поверхности полупроводника, при котором плотность заряда дырок превышает плотность заряда электронов и ионизированных атомов примеси. Плотности электронов и дырок в полупроводнике n -типа при изменении потенциала на поверхности раздела изменяются при изменении потенциала ϕ на границе между диэлектриком и полупроводником:

$$p = p_i e^{-\frac{q(V_F - \phi)}{kT}} = p_0 e^{q\phi/kT},$$

$$n = n_i e^{-\frac{q(V_F + \phi)}{kT}} = n_0 e^{-q\phi/kT},$$

где V_F — потенциал Ферми, k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, p_i , n_i — концентрации дырок и электронов в собственном полупроводнике — $p_0 = n_i e^{-qV_F/kT}$, $n_0 = n_i e^{qV_F/kT}$.

Проводящий канал образуется при

$$p_0 e^{q\phi/kT} > n_0 e^{-q\phi/kT} + N_D, \quad (1.4.1)$$

где

$$N_D = n_i (e^{qV_F/kT} - e^{-qV_F/kT}) \quad (1.4.2)$$

— плотность ионизированных атомов донорной примеси.

Подставляя (1.4.2) в (1.4.1), получаем

$$p_0 e^{q\phi/kT} > n_0 e^{-q\phi/kT} + n_i (e^{qV_F/kT} - e^{-qV_F/kT}),$$

откуда условие образования канала принимает вид

$$\phi > 2V_F. \quad (1.4.3)$$

Следовательно, заметная проводимость между стоком и истоком появляется при напряжении на затворе, превышающем сумму контактной разности потенциалов на МДП структуре фмдп, напряжения, соответствующего эффективному заряду поверхностных состояний, и напряжения на границе между диэлектриком и полупроводником, когда плотность подвижных дырок превышает плотность электронов и ионизированных атомов донорной примеси. Напряжение, эквивалентное эффективному заряду поверхностных состояний, равно $V_{п.с} = Q_{ss}/C_d$, где C_d — удельная емкость слоя диэлектрика, перекрывающего канал. Образующийся канал экранирует остальную область подложки. Поэтому дальнейшее изменение напряжения на затворе приводит к увеличению напряжения на слое диэлектрика, а напряжение на слое объемного заряда в подложке остается практически неизменным. Падение напряжения

на слое объемного заряда можно изменить, прикладывая напряжение к электроду подложки. Если к подложке приложено отрицательное напряжение, то оно способствует отпираанию p — n -переходов между подложкой и областями стока и истока. Если p — n -переходы смещены в прямом направлении, то транзистор выходит из рабочего режима. Положительное напряжение, приложенное к подложке, увеличивает толщину слоя объемного заряда и уменьшает проводимость канала. Увеличение напряжения на подложке может привести к полному исчезновению канала. Таким образом, подложка, как и затвор, может использоваться в качестве электрода, управляющего проводимостью канала.

Назовем пороговым напряжением $V_{пор}$ такое напряжение на затворе, при котором между стоком и истоком появляется индуцированный канал. Таким образом, пороговое напряжение — это напряжение на затворе, при котором заряд на затворе в точности компенсирует заряды, связанные с поверхностными состояниями и с обедненным слоем, а также создает на поверхности полупроводника потенциал, равный $2V_F$.

Под действием разности потенциалов между стоком и истоком в канале транзистора протекает ток стока I_c . При малых отрицательных напряжениях на стоке V_c ток I_c прямо пропорционален приложенному напряжению. Рост V_c , с одной стороны, увеличивает ток стока, так как увеличивается электрическое поле вдоль канала, с другой стороны, V_c компенсирует действие напряжения U_a , приложенного к затвору, что приводит к уменьшению толщины канала около стока и его проводимости. Изменение проводимости канала является причиной отклонения зависимости $I_c = f(V_c)$ от линейного закона. Кроме того, с ростом V_c увеличивается разность потенциалов между каналом и подложкой, что приводит к изменению толщины слоя объемного заряда по всей длине канала.

Толщина слоя объемного заряда максимальна около стока и минимальна у истока. Дальнейшее увеличение V_c приводит к насыщению тока стока. Когда напряжение на стоке станет равным $|V_{с.гр}| \approx |V_a| - |V_{пор}|$, канал в области стока оказывается перекрытым слоем объемного заряда. Падение напряжения на части канала, свободной от объемного заряда, стабилизируется, а ток I_c насыщается. При $|V_c| > |V_{с.гр}|$ растет толщина слоя объемного заряда. Длина канала L уменьшается на величину ΔL , что уменьшает омическое сопротивление части канала, свободной от объемного заряда, а так как падение напряжения остается равным $V_{с.гр}$, то ток стока несколько возрастает. Изменение длины канала с ростом V_c является причиной конечной величины выходного сопротивления МДП транзистора.

Граничное напряжение $V_{с.гр}$ делит вольт-амперные характеристики полевого транзистора на две области: крутую и пологую зависимости тока стока от напряжения.

Крутая и пологая области вольт-амперных характеристик являются рабочими областями МДП транзистора.

Изменение напряжения на затворе V_z приводит к изменению проводимости канала и величины тока стока. В транзисторах с встроенными каналами характер зависимости $J_c = f(V_c)$ остается таким же, как и в транзисторах с индуцированными каналами. Проводимость канала становится равной нулю при положительном напряжении на затворе, называемом напряжением отсечки.

Перейдем к выводу уравнения для вольт-амперных характеристик МДП транзистора.

1.4.3. УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП ТРАНЗИСТОРА

На рис. 1.37 приведены структура МДП транзистора с p -каналом и система координат, используемые при выводе уравнения вольт-амперных характеристик (ВАХ).

При расчете выражений для вольт-амперных характеристик воспользуемся следующими допущениями: ток в канале обусловлен дрейфом подвижных носителей под действием разности потенциалов между стоком и истоком; подвижность постоянна и не зависит от напряженности электрического поля; ток через подложку отсутствует; ток в канале обусловлен подвижными дырками, электронная составляющая тока отсутствует; не учитываются генерационная и рекомбинационная составляющие тока в канале; изменение толщины канала вдоль оси y мало по сравнению с длиной канала; в канале присутствует только продольная составляющая электрического поля, в слое объемного заряда присутствует только поперечная составляющая электрического поля; плотность заряда поверхностных состояний вдоль границы раздела диэлектрика и полупроводника постоянна; электрическое поле в подложке сосредоточено только в слое объемного заряда; основной объем полупроводника электрически нейтрален; диэлектрик идеальный, ток в цепи затвора отсутствует.

В стационарном состоянии полный заряд в МДП структуре, приходящийся на единицу площади, должен равняться нулю. Следовательно,

$$Q = Q_p + Q_{ss} + Q_{o.c} + Q_n + Q_{мдп}, \quad (1.4.4)$$

где Q — заряд, обусловленный напряжением, приложенным к затвору; Q_p — заряд подвижных дырок в подложке; Q_n — заряд электронов; $Q_{o.c}$ — заряд обедненного слоя; $Q_{мдп}$ — заряд электронов в подложке, обусловленный разностью работ выхода в МДП структуре.

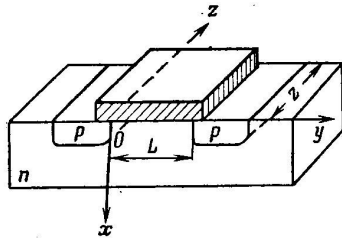


Рис. 1.37. Структура МДП транзистора и система координат, используемые при выводе уравнения вольт-амперных характеристик (ВАХ)

Для создания в поверхностном слое индуцированного канала заряд подвижных дырок Q_p должен превышать заряд электронов Q_n (ток в канале в соответствии с принятыми допущениями равен нулю: $Q_n = 0$). Ток, протекающий в канале, обусловлен дрейфом дырок от истока к стоку. Следовательно,

$$J_c = z \int_0^{x_k} \sigma_p \mathcal{E}_y dx, \quad (1.4.5)$$

где $\mathcal{E}_y$ — напряженность электрического поля в канале вдоль оси y ; σ_p — удельная проводимость канала; z — ширина транзистора; x_k — толщина канала.

На основе принятых допущений выражение (1.4.5) можно записать в следующем виде:

$$J_c = -z \int_0^{x_k} q \mu_p p \frac{d\varphi_{rp}(y)}{dy} dx = -q z \mu_p \frac{d\varphi_{rp}(y)}{dy} \int_0^{x_k} p dx, \quad (1.4.6)$$

где μ_p — средняя поверхностная подвижность дырок в канале; p — удельная концентрация дырок в канале.

В соответствии с (1.4.6)

$$q \int_0^{x_k} p dx = Q_p = Q - Q_{o.c} - Q_{мдп} - Q_{ss}. \quad (1.4.7)$$

Таким образом, чтобы найти выражение для вольт-амперных характеристик, необходимо определить зависимость Q и $Q_{o.c}$ от приложенных напряжений. Заряд обедненного слоя, приходящийся на единицу площади, равен

$$Q_{o.c} = q N_D h(y) = \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon q N_D} [-\varphi_{rp}(y) + V_n]^{1/2}, \quad (1.4.8)$$

где $N_D q$ — заряд ионизированных атомов донорной примеси; h — толщина слоя объемного заряда; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\varphi_{rp}(y) = -\varphi_{rp}(x_k)$ — потенциал на границе между слоем объемного заряда и каналом; V_n — потенциал на подложке.

Наведенный заряд, обусловленный напряжением, приложенным к затвору, зависит от разности потенциалов между затвором и каналом и от емкости диэлектрического слоя. Так как после образования канала все напряжение, приложенное к затвору, падает на диэлектрике, то

$$Q = C_d [-V_z - \varphi_{rp}(y)], \quad (1.4.9)$$

где $C_d = \epsilon_0 \epsilon d / d$ — удельная емкость диэлектрика; ϵ_d — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; d — толщина диэлектрика.

Заряд, обусловленный разностью работ выхода в МДП структуре, также можно выразить через емкость диэлектрического слоя:

$$Q_{\text{МДП}} = \Phi_{\text{МДП}} C_d. \quad (1.4.10)$$

Подставляя (1.4.7) в (1.4.6), заменяя Q , $Q_{\text{о.с.}}$, $Q_{\text{МДП}}$ выражениями (1.4.9), (1.4.8), (1.4.10) соответственно и учитывая знаки зарядов, получим

$$J_c = -z\mu_p \{ C_d [-V_s - \Phi_{\text{гп}}(y)] + V_{\text{МДП}} C_d + Q_{\text{ss}} + \\ + \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon q N_D} [-\Phi_{\text{гп}}(y) + V_n]^{1/2} \} \frac{d\Phi_{\text{гп}}(y)}{dy}. \quad (1.4.11)$$

Интегрируя выражение (1.4.11) по длине канала от 0 до L и по напряжению от $\Phi_{\text{гп}}(0) = -\Phi_{\text{к0}}$ до $\Phi_{\text{гп}}(L) = -(V_c + \Phi_{\text{к0}})$, получим

$$J_c = \frac{ze_0 \epsilon_d \mu_p}{L_d} \left\{ \left[V_s - V_{\text{МДП}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_d} - \Phi_{\text{к0}} \right] V_c - \frac{1}{2} V_c^2 - \right. \\ \left. - \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{\epsilon_d \epsilon_0} \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon q N_D} [(V_c + V_n + \Phi_{\text{к0}})^{3/2} - (V_n + \Phi_{\text{к0}})^{3/2}] \right\}. \quad (1.4.12)$$

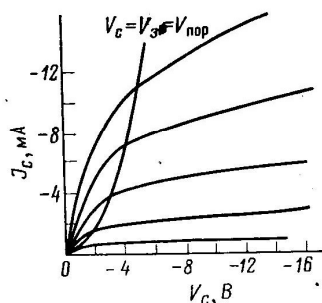


Рис. 1.38. Расчетные характеристики МДП транзистора

В выражение (1.4.12) следует подставлять абсолютные значения напряжений на стоке, затворе и подложке. Знаки этих величин учтены при выводе формулы. Выражение (1.4.12) описывает зависимость $J_c = f(V_s, V_c, V_n)$ транзистора только в крутой области характеристик, где отсутствует насыщение тока при изменении V_c . Как было отмечено выше, с ростом V_c ток J_c насыщается. Около стока канал перекрывается слоем объемного заряда, все дополнительное изменение напряжения на стоке падает на слое объемного заряда, а ток стока поддерживается приблизительно постоянным.

Согласно упрощенной модели в пологой области ВАХ МДП транзистора описывается выражением

$$J_c = \frac{z\mu_p \epsilon_d \epsilon_0}{2dL} (V_s - V_{\text{пор}})^2, \quad (1.4.13)$$

которое справедливо при $|V_c| \geq V_s - V_{\text{пор}}$ и отражает квадратичную зависимость тока стока от напряжения на затворе и то, что ток не зависит от напряжения на стоке, т. е. вольт-амперные характеристики проходят горизонтально.

Расчетные характеристики МДП транзистора представлены на рис. 1.38.

Однако выходные характеристики реальных МДП транзисторов показывают, что ток J_c слабо, но зависит от V_c . Для объяснения этого эффекта необходимо учитывать следующие явления: модуляцию длины канала под действием V_c , генерацию и рекомбинацию носителей в обедненной области стока, пробойные явления.

Модуляция длины канала

На рис. 1.39 изображена структура области канала, использованная при построении модели прибора, имеющего выходное сопротивление конечной величины при насыщении тока. На этом рисунке видны две основные особенности структуры:

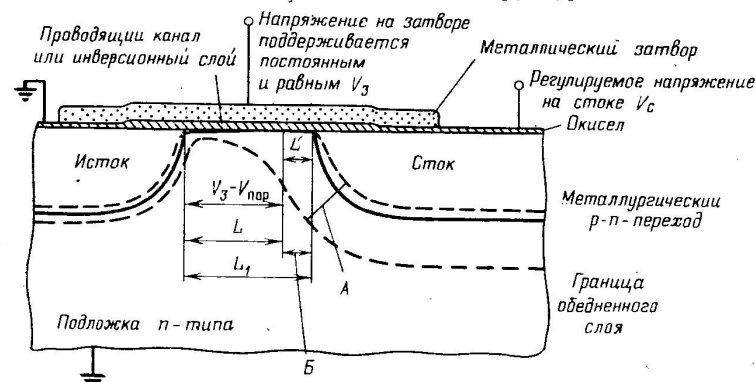


Рис. 1.39. Схематическая модель структуры области канала: А — напряжение V_c на стоковом конце обедненного слоя; Б — напряжение $V_c - (V_s - V_{\text{пор}})$ на обедненном слое у поверхности между каналом и стоком; L_T — полная длина канала от истока до стока; L' — расстояние от точки перекрытия канала до стока; $L_T - L'$ — эффективная длина канала

1) обедненный слой простирается в область канала, и толщина этого слоя зависит от напряжения на стоке;

2) падение напряжения на участке канала, начинающемся от истока, в первом приближении не зависит от потенциала стока.

Ранее указывалось, что напряжение на канале имеет тенденцию оставаться постоянным и равным $V_s - V_{\text{пор}}$. Любая разность между потенциалом стока и падением напряжения на канале оказывается приложенной к обедненному слою у поверхности полупроводника (длина этого слоя L'). Падение напряжения на этой области равно $V_c - (V_s - V_{\text{пор}})$. При увеличении V_c величина L' возрастает. Таким образом, модуляция напряжением на стоке приводит к модуляции эффективной длины канала $L = L_T - L'$, где L_T — полная длина канала от истока до стока. Увеличение напряжения на стоке ведет к уменьшению длины канала и, следовательно, его сопротивления. Для сохранения постоянным паде-

ния напряжения на канале ($V_3 - V_{\text{пор}}$) ток стока должен возрасти так, чтобы компенсировать уменьшение сопротивления канала. Это увеличение тока с увеличением выходного напряжения представляет собой положительную обратную связь, которая обуславливает конечное значение выходного сопротивления МДП транзистора.

Выражение для тока стока при насыщении (1.4.13) можно преобразовать так, чтобы в нем была учтена конечная величина выходного импеданса. Заменяя L на величину $L_T - L'$, запишем уравнение для тока стока в виде

$$J_c = J_{c0} \frac{L_T}{L_T - L'}, \quad L' = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 [V_c - (V_3 - V_{\text{пор}})]}{qN}}, \quad (1.4.14)$$

где $J_{c0} = \frac{2\mu_p \epsilon_d \epsilon_0}{Ld} (V_3 - V_{\text{пор}})^2$ — ток стока в точке насыщения или перекрытия канала, N — концентрация примесей в подложке.

Из уравнения (1.4.14) следует, что при возрастании напряжения на стоке увеличивается L' , что вызывает увеличение тока стока.

Генерация и рекомбинация носителей в обедненной области стока

Так как исток и подложка находятся под одним потенциалом, то можно считать, что ток генерации J_G уравнивает ток рекомбинации J_R в p - n -переходе «исток — подложка». Сток и подложка образуют обратносмещенный p - n -переход, в котором $J_G \gg J_R$. Этот ток складывается с током стока J_c и, таким образом, дает дополнительный наклон ВАХ МДП транзистора в области насыщения.

Эффект подложки

Термин «эффект подложки» относится к изменениям характеристик транзистора в случае подачи напряжения между истоком и подложкой.

С увеличением напряжения на подложке, (нижнем затворе) $V_{п.з}$ обедненный слой расширяется в глубь подложки. Так как $Q_a = Q_{ss} + Q_{o.c} + Q_p$, то увеличение $Q_{o.c}$ равнозначно увеличению $V_{\text{пор}}$, а следовательно, уменьшению J_c (рис. 1.40). С учетом обратного смещения подложки для порогового напряжения получается следующее выражение:

$$V_{\text{пор}} = -K \sqrt{2V_F + V_{п.з}} + V_{п.с}, \quad (1.4.15)$$

где

$$K = \pm \frac{1}{C_d} \sqrt{2q\epsilon\epsilon_0 N},$$

$$V_{п.с} = Q_{ss}/C_d,$$

$V_F = \frac{kT}{q} \ln(N/n_i)$ — потенциал Ферми ($N = N_D$ для прибора с каналом p -типа, $N = N_A$ для прибора с каналом n -типа).

Зависимость $V_{\text{пор}}$ от величины $\sqrt{2V_F + V_{п.з}}$ приведена на рис. 1.41.

Тангенс угла наклона на графике, приведенном на рис. 1.41, равен K . Зная K , можно найти концентрацию примеси в подложке N_D :

$$N_D = \frac{(kC_d)^2}{2\epsilon q}. \quad (1.4.16)$$

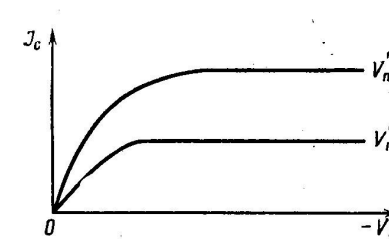


Рис. 1.40. Выходные характеристики МДП транзистора при различном смещении на подложке $V_{п.з}'' > V_{п.з}'$

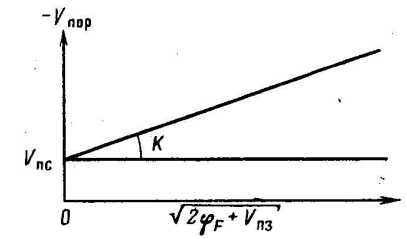


Рис. 1.41. Зависимость порогового напряжения $V_{\text{пор}}$ от напряжения подложка-затвор

Полученная экстраполяцией точка пересечения графика с осью ординат соответствует $V_{п.с}$ — части порогового напряжения, обусловленного зарядом Q_{ss} . Вычислив $V_{п.с}$, можно найти концентрацию поверхностных состояний $N_{п.с}$:

$$V_{п.с} = -\frac{Q_{ss}}{C_d} = -\frac{qN_{п.с}d}{\epsilon_d \epsilon_0}. \quad (1.4.17)$$

Отсюда

$$N_{п.с} = \frac{V_{п.с} \epsilon_d \epsilon_0}{qd}. \quad (1.4.18)$$

Так как изменение напряжения на подложке приводит к изменению J_c , то подложку можно рассматривать как второй управляющий электрод.

Пробой в МДП транзисторах

Электрический пробой МДП транзистора может быть обусловлен следующими причинами:

- 1) пробоем p - n -переходов «сток — подложка», «исток — подложка»;
- 2) пробоем в канале между истоком и стоком;
- 3) пробоем окисла под затвором.

Пробой p - n -переходов «сток — подложка» и «исток — подложка» обусловлен теми же причинами, что и пробой в диодах.

Пробой в канале между истоком и стоком происходит в области с максимальной напряженностью поля, т. е. в области около стока, и обусловлен лавинным рождением электронно-дырочных пар. Поскольку эти дырки и электроны ослабляют действие поля в канале, то нарастание тока происходит довольно плавно и в широком диапазоне напряжений. «Мягкая лавина» в канале приводит к уменьшению сопротивления стока в пологой области, что особенно сказывается в приборах с малой длиной канала. Вблизи пробивного напряжения составляющая тока почти незаметно увеличивается с ростом напряжения на затворе. Максимальное напряжение на затворе ограничено пробивным напряжением слоя окисла $V_{з.пр}$. Критическое поле в двуокиси кремния, при котором происходит пробой окисла, равно 10^6 — 10^7 В/см.

Когда напряжение на затворе достигает величины $V_{з.пр}$, ток резко возрастает, что может привести к разрушению окисла, к потере им изоляционных свойств. Поэтому важно отметить, что из-за высокого сопротивления окисла на затворе может накапливаться заряд статического электричества и вызывать пробой окисла или ухудшение его изоляционных свойств. Наличие заряда в окисле приводит к тому, что величина пробойного напряжения различна для различной полярности.

ЭКСПЕРИМЕНТ

1.4.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП ТРАНЗИСТОРА

Характеристики прибора зависят от структуры канала (встроенный или индуцированный). Для прибора с встроенным каналом напряжение на затворе V_z может быть как отрицательным, так и положительным. При отрицательном напряжении V_z электроны частично «выталкиваются» из канала и канал обедняется основными носителями. При этом проводимость канала и ток стока уменьшаются. Этот режим работы МДП транзистора называется режимом обеднения. При положительном напряжении на затворе V_z электроны дополнительно притягиваются в область канала и он обогащается носителями. Проводимость канала и ток стока в этом случае увеличиваются. Такой режим работы называется режимом обогащения.

В МДП транзисторах с индуцированным каналом напряжение на затворе, при котором транзистор способен усиливать сигнал, может быть только одной полярности: положительной для транзисторов с n -каналом и отрицательной для транзисторов с p -каналом. При другой полярности напряжения на затворе в транзисторах с индуцированным каналом ток стока отсутствует. Для того чтобы создать канал и вызвать протекание тока, необходимо подать на затвор достаточно большое напряжение, которое приводит к образованию инверсного слоя.

Выходные характеристики транзисторов с индуцированным и встроенным каналами имеют вид, представленный на рис. 1.42.

Если на семействе выходных характеристик провести линию постоянного напряжения стока и начертить зависимость между выходным током и входным напряжением, то получится кривая, которая носит название передаточной характеристики. Передаточные характеристики полевых транзисторов с индуцированным и встроенным каналами приведены на рис. 1.43 и иллюстрируют величину порогового напряжения и квадратичный характер зависимости между входным напряжением и выходным током прибора.

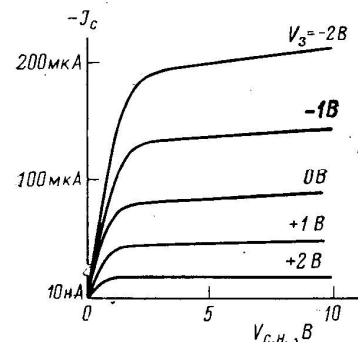


Рис. 1.42. Характеристики МДП транзистора с встроенным каналом p -типа

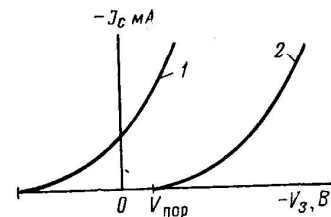


Рис. 1.43. Передаточные характеристики МДП транзистора: 1) с встроенным каналом; 2) с индуцированным каналом

Если к стоку приложено небольшое напряжение, то ток от истока к стоку течет через проводящий канал, который действует как сопротивление, и ток стока J_c пропорционален напряжению V_c . Это линейная область работы прибора. Если напряжение на стоке увеличивать, то в конце концов достигается такое его значение, при котором глубина канала вблизи стока становится равной нулю. Это соответствует отсечке, за которой ток стока испытывает насыщение и практически не меняет своей величины с ростом напряжения стока. Поскольку наибольший потенциал в канале наблюдается у стокового электрода, то перекрытие канала наступает со стороны стока. При дальнейшем повышении напряжения на стоке МДП транзистор переходит в состояние все более глубокого насыщения. Это приводит к увеличению обедненных областей, прилегающих к стоку, и уменьшению длины канала. Слишком большое увеличение напряжения на стоке может вызвать распространение обедненной области от стока до истока, что приводит к возникновению неконтролируемого тока, величина которого будет ограничиваться только внешними элементами цепи.

Напряжение стока, соответствующее переходу вольт-амперной характеристики от крутой области к пологой, называется напряжением насыщения $V_{с.н}$. Для определения напряжения $V_{с.н}$ полагают, что заряд подвижных носителей в области стока равен нулю. Математически это выражается следующим уравнением:

$$C_d(V_z - V_{с.н}) = -(Q_{ss} + Q_{oc}) \quad (1.4.19)$$

и

$$V_{с.н} = V_3 - V_{пор},$$

$$\text{где } V_{пор} = \frac{Q_{ss} + Q_{o,c}}{C_d}.$$

Таким образом, справа от граничной линии $V_{с.н}$ прибор работает в пологой области и $|V_c| > |V_3 - V_{пор}|$, слева от этой линии прибор работает в крутой области и $|V_c| < |V_3 - V_{пор}|$.

1.4.5. ПАРАМЕТРЫ МДП ТРАНЗИСТОРА

Крутизна вольт-амперной характеристики

Усилительные свойства МДП транзистора характеризуются крутизной S передаточной характеристики (рис. 1.43), которая выражает изменение тока от изменения входного напряжения:

$$S = \left. \frac{\partial J_c}{\partial V_3} \right|_{V_c = \text{const}}. \quad (1.4.20)$$

В пологой области вольт-амперной характеристики крутизна равна

$$S = \frac{\mu_p \epsilon_d \epsilon_0}{L_d} (V_3 - V_{пор}). \quad (1.4.21)$$

Крутизна в этой области может быть увеличена одним из двух способов: либо уменьшением напряжения на затворе, либо изменением геометрии прибора — отношения ширины канала к его длине.

Типичные значения величины крутизны для отдельных МДП транзисторов лежат в пределах 0,5—2,0 мА/В.

Внутреннее, или динамическое, сопротивление

Внутреннее, или динамическое, сопротивление R_i определяется выражением

$$R_i = \left. \frac{\partial V_c}{\partial J_c} \right|_{V_3 = \text{const}}. \quad (1.4.22)$$

В пологой области характеристики $R_i \rightarrow \infty$; в реальных приборах $R_i = 40—100$ КОм. В крутой области

$$\frac{1}{R_i} = \frac{\mu_{с.к}}{L^2} (V_3 - V_{пор} - V_c). \quad (1.4.23)$$

Сопротивление затвора

Сопротивление затвора R_3 является функцией напряжения на затворе V_3 , напряжения на стоке V_c , порогового напряжения $V_{пор}$ и имеет значение $10^{10}—10^{15}$ Ом.

1.4.6. ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА МДП ТРАНЗИСТОРА

Качество приборов, управляемых напряжением, определяется отношением крутизны S и входной емкости $C_{вх}$ затвора прибора. По нему можно оценить полосу пропускания прибора Δf :

$$\Delta f = S/C_{вх} = -\frac{\mu}{L^2} (V_3 - V_{пор}). \quad (1.4.24)$$

Полоса пропускания зависит только от длины канала и не зависит от его ширины, так как увеличение ширины канала в одинаковой степени повышает емкость прибора и его крутизну. В реальных приборах предельная рабочая частота ограничена величиной в несколько сотен мегагерц.

Характеристики и параметры МДП транзисторов измеряются по точкам на стандартных измерительных приборах: Л2-31 — измерителе статических параметров полевых транзисторов и Л2-32 — измерителе крутизны полевых транзисторов либо автоматически с использованием стандартного характериографа Л2-56 (ПНХТ-2) — измерителя характеристик полупроводниковых приборов.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Построить семейство выходных характеристик МДП транзистора $J_c = f(V_c)|_{V_3}$ в прямом включении. По характеристикам определить величины $V_{пор}$, $1/R_{вых}$.

2. Построить семейство передаточных характеристик $J_c = f(V_3)|_{V_c}$ МДП транзистора в прямом включении. Построить зависимость $\sqrt{J_c} = f(V_3)$. Определить экстраполированное значение $V_{пор}$. Рассчитать величину крутизны S .

3. Измерить на приборе Л2-31 выходную дифференциальную проводимость $1/R_{вых}$ и сравнить со значением, полученным из измерения выходных характеристик.

4. Измерить на приборе Л2-31 пороговое напряжение $V_{пор}$ по заданному уровню тока стока $J_c = -100$ мкА и сравнить со значением, полученным из измерения передаточных характеристик.

5. Измерить на приборе Л2-32 крутизну характеристик S и сравнить со значением, полученным из измерения передаточных характеристик.

6. Снять на приборе Л2-31 зависимость порогового напряжения от напряжения на подложке $V_{пор} = f(V_n)$. Построить график $V_{пор} = f(\sqrt{2V_F + V_{п.з}})$. По построенному графику рассчитать: а) концентрацию примеси в подложке; б) концентрацию поверхностных состояний.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Кроуфорд Р. Схемные применения МДП транзисторов. М.: Мир, 1970.
2. Валиев К. А., Кармазинский А. И., Королев М. А. Цифровые интегральные схемы на МДП транзисторах. М.: 1971.
3. Интегральные схемы на МДП приборах. Под ред. В. М. Пенни. М.: Мир, 1975.

Дополнительная

1. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов. Л.: Энергия, 1975.
2. Специальный физический практикум. Под ред. А. А. Харламова. Т. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.