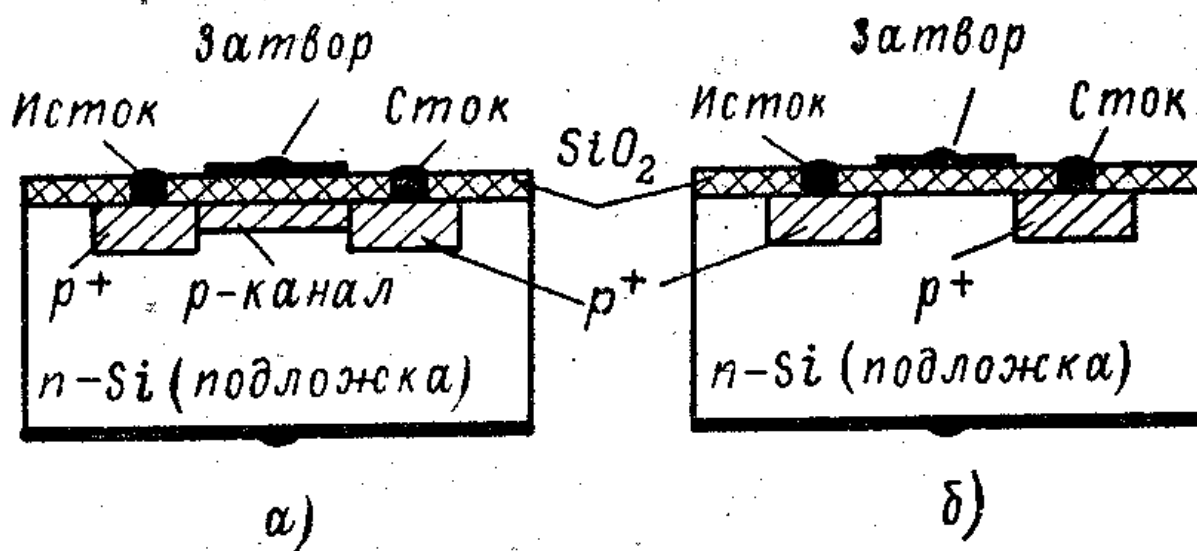


§ 5 «Полевые транзисторы с изолированным затвором. Структура и классификация»

Спецификой полевых транзисторов с управляющим р-п переходом является максимальная проводимость канала при нулевом смещении на затворе. С ростом смещения (по модулю) проводимость канала уменьшается вплоть до полной отсечки. Смещение может иметь только одну полярность, соответствующую отсутствию инжекции через переход.

У полевых транзисторов с изолированным затвором затвор представляет собой металлический слой, изолированный от полупроводника тонкой диэлектрической пленкой. Наличие диэлектрика снимает ограничение на полярность смещения: она может быть как положительной, так и отрицательной, причем в обоих случаях ток затвора отсутствует. Структура таких транзисторов (металл-диэлектрик-полупроводник) лежит в основе широко распространенного их названия МДП-транзисторы. В том весьма распространенном случае, когда диэлектриком является окисел (двуокись кремния), их называют МОП-транзисторами (по-английски MOS).

Существует две основные структуры МДП-транзисторов:



Первая из них характерна наличием специально изготовленного (собственного или встроенного) канала, проводимость которого модулируется смещением на затворе. В случае канала р-типа положительный потенциал U_z «отталкивает» дырки из канала (режим обеднения), а отрицательный — «притягивает» их (режим обогащения). Соответственно проводимость канала либо уменьшается, либо увеличивается по сравнению с ее значением при нулевом смещении.

Вторая структура характеризуется отсутствием структурно выраженного канала. Поэтому при нулевом смещении на затворе проводимость между истоком и стоком отсутствует: исток и сток образуют с подложкой встречно включенные р-п переходы. Тем более не может быть проводимости между истоком и стоком при положительной полярности смещения, когда к поверхности полупроводника притягиваются дополнительные электроны. Однако при достаточно большом отрицательном смещении, когда приповерхностный слой сильно обогащается притянутыми дырками, между истоком

и стоком образуется индуцированный (наведенный полем) канал, по которому может протекать ток.

Оба типа МДП-транзисторов могут изготавливаться как с р- так и с n-каналом, что дополнительно расширяет возможности их схемного применения.

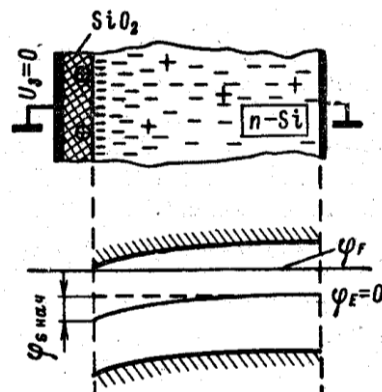
§6 «Физические процессы в полевых транзисторах с изолированным затвором»

Рассмотрим работу МДП-транзистора с индуцированным р-каналом, наиболее типичным для данного класса приборов.

Далее все напряжения и потенциалы будем записывать в виде их модулей, чтобы избежать знаков минуса, характеризующих отрицательную полярность смещений в транзисторах р-типа.

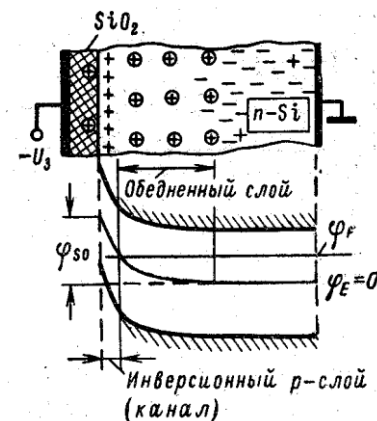
В отсутствие смещений ($U_3 = 0$, $U_C = 0$) приповерхностный слой полупроводника обычно обогащен электронами из-за наличия ловушек на границе Si – SiO₂ и наличия положительных ионов в пленке диэлектрика. Эти ионы являются следствием фотолитографической обработки пластины, а также предшествующего окисления. Наиболее вероятны ионы натрия и водорода.

Соответственно энергетические зоны искривлены вниз, и начальный поверхностный потенциал $\varphi_{s \text{ нач.}}$ отрицателен.



По мере роста отрицательного смещения U_3 электроны отталкиваются от поверхности. При этом энергетические зоны сначала спрямляются, а затем искривляются вверх, т. е. поверхностный потенциал делается положительным. Однако до тех пор, пока приповерхностная область сохраняет электронный тип проводимости или, точнее, пока сток и исток образуют с этой областью выпрямляющие контакты, проводимость рабочей цепи остается крайне малой и протекание заметного тока в этой цепи по-прежнему невозможно.

Существует некоторое пороговое напряжение $U_3 = U_0$, по превышении которого



энергетические зоны искривляются настолько сильно, что вблизи поверхности образуется инверсионный дырочный слой. Именно этот слой играет роль индуцированного канала.

Принято считать, что пороговое напряжение соответствует поверхностному потенциалу $\phi_{s0} = 2\phi_F$. Дальнейший рост напряжения U_3 слабо влияет на величину ϕ_s , поскольку изменения последней всего на несколько ϕ_T уже достаточно для изменения концентрации дырок в десятки раз.

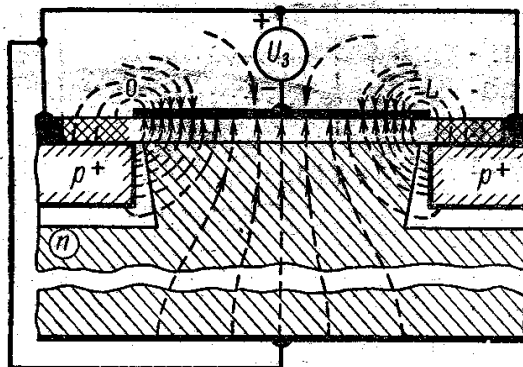
$$\phi_T = kT/q \approx T/11600$$

$$\text{При } T = 300 \text{ К } \phi_T \approx 0,025 \text{ В} \approx 25 \text{ мВ}$$

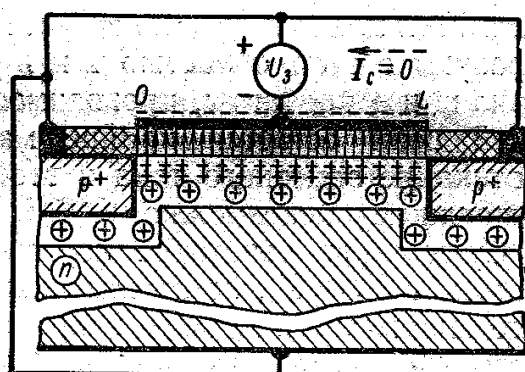
Наряду с образованием дырочного канала под затвором образуется также обедненный слой, в котором положительный заряд обусловлен появившимися в результате свободными ионами доноров. Образование обедненного слоя вызвано отталкиванием основных носителей подложки – электронов – от поверхности.

Инверсионный слой значительно тоньше обедненного слоя. Толщина обедненного слоя обычно составляет сотни ангстрем, а толщина индуцированного канала составляет всего 10—20 ангстрем. В результате, дырки буквально «прижаты» к поверхности полупроводника. Отсюда ясно, что структура и свойства границы полупроводник - диэлектрик играют в МДП-транзисторах весьма важную роль.

Если в начальном состоянии все электроды МДП-транзистора находились при нулевом потенциале, а затем на затвор была подана ступенька напряжения $U_3 > U_0$, то в первый момент поле будет иметь примерно такую конфигурацию:



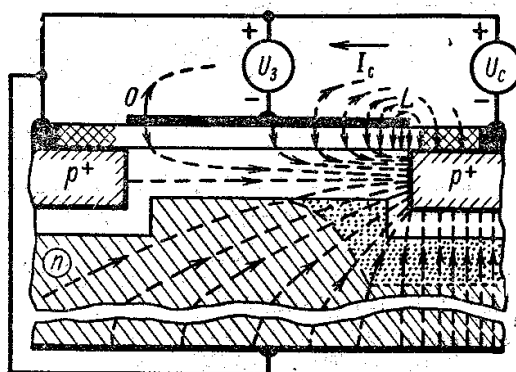
Под действием этого поля электроны перемещаются в сторону от поверхности, освобождая при этом ионы доноров и образуя обедненный слой, а дырки движутся к поверхности, накапливаются вблизи границы с диэлектриком и образуют канал. Равновесие наступает тогда, когда поле, обусловленное дырками и ионами доноров, компенсирует исходное поле в подложке, а также на границах истока и стока. Можно считать, что описанный переходный процесс соответствует заряду емкости затвора. В установившемся состоянии основная часть подложки нейтральна, а поле ограничено узким участком под затвором: силовые линии начинаются на дырках и ионах доноров (а также на ионах в диэлектрике) и кончаются на электроде затвора.



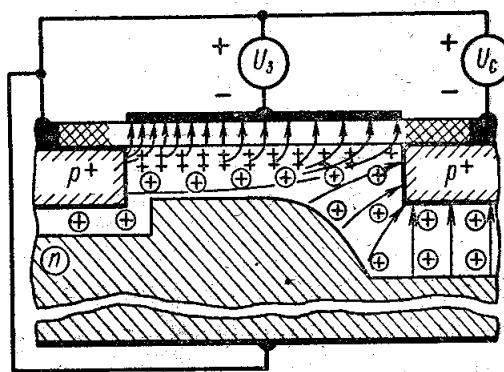
Поле в диэлектрике однородное, поскольку потенциал всей поверхности полупроводника одинаков и равен $\varphi_s = \varphi_{s0}$.

Следует отметить, что дырки поступают в канал не только из подложки, но также из высоколегированных p^+ -слоев истока и стока, причем эти электроды являются главными «поставщиками» дырок, поскольку напряженность исходного «тянущего» поля вблизи этих электродов максимальна, а концентрация дырок в них практически неограничена, тогда как в подложке n -типа дырок мало и они генерируются сравнительно медленно (с некоторой постоянной времени τ).

Если теперь, при наличии канала (т. е. при условии $U_z > U_0$), подать напряжение отрицательной полярности между стоком и истоком (считая, что последний по-прежнему соединен с подложкой), то в первый момент появляется дополнительное поле.



Свободные носители начнут двигаться в этом поле, дырки – в сторону стока, электроны – в противоположном направлении. Перемещение электронов в подложке сопровождается обнажением дополнительных ионов доноров (т. е. расширением объемного заряда вокруг стока) и соответствующим нарастанием «противополя», обусловленного этими ионами. Данный процесс (процесс заряда барьерной емкости стока) закончится тогда, когда результирующее поле в подложке снова делается равным нулю, а силовые линии стока будут замыкаться уже не на электрод подложки, а на слой дополнительного заряда донорных ионов.



Что касается дырок, то их «отход» из канала сопровождается изменением удельного заряда поверхности (имеется в виду заряд на единицу площади затвора). Согласно теореме Гаусса удельный заряд поверхности однозначно связан с напряженностью поля в диэлектрике выражением:

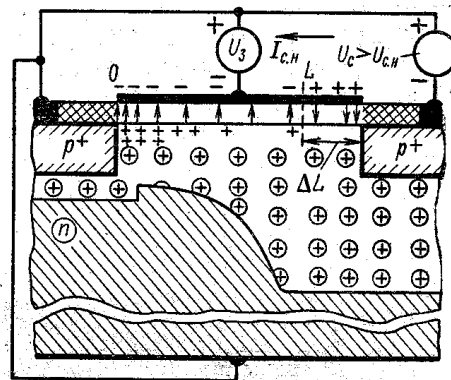
$$Q_0 = \epsilon_0 \epsilon_d E.$$

Следовательно, поле в диэлектрике становится неоднородным: его напряженность убывает от истока к стоку. Такой вывод вполне естествен и основан на том простом факте, что потенциал поверхности под затвором меняется от нуля (на границе затвора) до U_c (на границе стока).

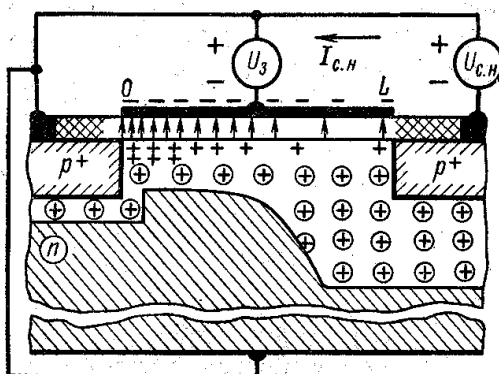
Если «сложить» поля, то результирующее поле в установившемся состоянии (по окончании заряда барьерной емкости стока) будет иметь примерно такую конфигурацию, как показано на рисунке выше. Как видим, поле в диэлектрике действительно неоднородное, а в самом канале появилась составляющая поля, которая обеспечивает движение дырок (ток), а также их пополнение из p-слоя истока.

Силовые линии непосредственно между истоком и стоком практически отсутствуют, поэтому дырочный канал нельзя уподобить проводящей пластинке, включенной между этими электродами. Иначе говоря, нельзя сказать, что именно поле стока обуславливает движение дырок в канале, включая их «вытягивание» из истока. На самом деле роль стока проявляется в следующих двух взаимосвязанных факторах. Во-первых, наличие потенциала U_c приводит к увеличению напряженности поля в обедненном слое, окружающем сток, а значит, к «отходу» дырок, расположенных в этом слое вблизи поверхности; тем самым «инициируется» движение дырок. Во-вторых, потенциал U_c изменяет поле между истоком и затвором так, что оно приобретает составляющую, необходимую для движения дырок и, в частности, для их «вытягивания» из истока.

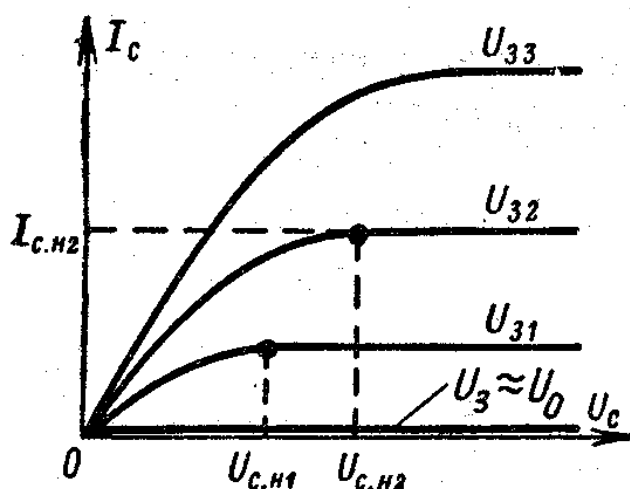
При некотором критическом потенциале стока, который называется напряжением насыщения $U_{cн}$, поле в диэлектрике и удельный заряд в полупроводнике вблизи стока делаются равными нулю.



Это значит, что на границе стока образуется «горловина» дырочного канала или, иными словами, в этом месте обедненный слой доноров «выходит на поверхность». При значениях $U_c > U_{cн}$ обедненный слой на поверхности расширяется пропорционально $\sqrt{U_c - U_{cн}}$, как в обычном p-n переходе, а «горловина» канала, сохраняющая потенциал $U_{cн}$, соответственно сдвигается в сторону от стока. Тем самым происходит некоторое укорочение канала.



Семейство характеристик МДП-транзистора показано на рисунке.



С увеличением напряжения на стоке (при постоянном потенциале (U_3) ток I_c сначала нарастает почти линейно (пока дырочный канал вблизи стока слабо деформирован), затем нарастание тока замедляется (поскольку канал вблизи стока сужается и его сопротивление растет) и наконец, получается участок насыщения, где ток остается почти постоянным (небольшой рост тока обусловлен модуляцией длины канала). Если увеличить напряжение U_3 , то канал обогатится дырками, его исходное сопротивление уменьшится и соответствующая кривая $I_c(U_c)$ пройдет выше. Насыщение тока в этом случае наступит позднее, так как исходный удельный заряд дырок стал больше и, чтобы свести его к нулю, требуется большее напряжение $U_{с.н}$.

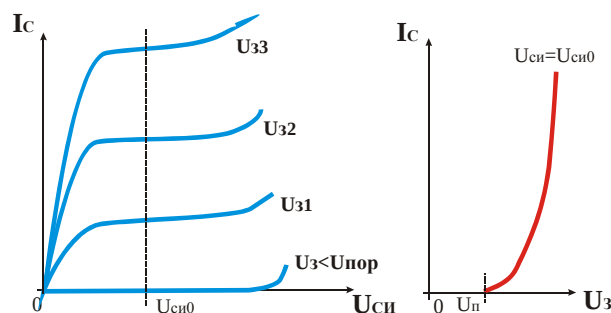
В целом семейство вольт-амперных характеристик МДП-транзистора напоминает семейство характеристик полевого транзистора с управляющим р-п переходом.

Главное отличие состоит в том, что с ростом параметра U_3 у МДП-транзистора ток увеличивается (режим обогащения), а у полевого транзистора с управляющим р-п переходом уменьшается (режим обеднения). Кроме того, на семействе характеристик МДП-транзистора отсутствует кривая с параметром $U_3 = 0$, поскольку канал индуцируется только при условии $U_3 > U_0$. При значениях $U_3 < U_0$ в цепи стока протекает очень небольшой остаточный ток — ток обратно смещенного стокового перехода.

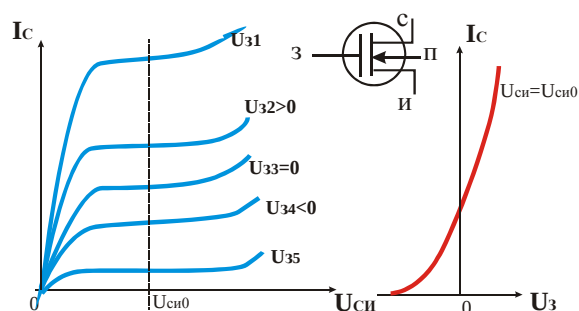
Полупроводниковые области истока и стока создают из сильно легированного, обладающего хорошей проводимостью, материала, отличающегося по типу от материала базового кристалла. Таким образом, при отсутствии напряжения на затворе между истоком и стоком оказываются два встречно включенных диода и соответственно ток в

этой цепи будет равен обратному току одного из диодов, т.е. весьма мал и транзистор будет находиться в закрытом состоянии. Для того чтобы транзистор открылся, на затвор необходимо подать такой потенциал относительно потенциала подзатворной области, чтобы на поверхности произошла инверсия проводимости. При этом под затвором индуцируется область типа проводимости, противоположная типу подложки и образующая канал соединяющий области истока и стока, встречно включенные р-п переходы исчезают, и в стоковой цепи начинает протекать ток. Напряжение затвора, при котором происходит инверсия проводимости подзатворной области и начинает протекать ток, называют пороговым ($U_{П}$). Стоковый ток тем выше, чем больше индуцированный в канале заряд и соответственно больше проводимость индуцированного канала. При работе транзистора в усилительном режиме полярность напряжения на стоке относительно истока задается такой, чтобы основные носители дрейфовали к стоку. Полярность напряжений, подаваемых на электроды МДП с индуцированными п и р каналами, при их работе в усилительном режиме противоположна. Для п канального транзистора на затвор подается плюс относительно истока, на р канальный транзистор минус. За сток принимается тот электрод, к которому дрейфуют основные носители, т.е. в р канальном транзисторе сток должен быть отрицательным относительно истока и в п канальном положительным.

Вольтамперные характеристики МДП транзистора: выходные и передаточные.



Канал между истоком и стоком можно создать технологическим путем на стадии изготовления МДП транзистора (например, вводя соответствующую примесь), такие транзисторы называют транзисторами со встроенным каналом. При подаче напряжения на затвор концентрация носителей в канале будет либо возрастать, либо уменьшаться вплоть до полного исчезновения канала и перехода транзистора в запертое (выключенное) состояние, в котором выходные токи будут определяться обратными характеристиками исток-стоковых р-п переходов.



Графическое обозначение МДП транзистора с встроенным каналом и его вольтамперные характеристики: выходные (слева) и передаточные (справа).