В последние годы большое место в электронике заняли приборы,

использующие явления в приповерхностном слое полупроводника. Основным

элементом таких приборов является структура

Металл-Диэллектрик-Полупроводник /МДП/. В качестве диэллектрической

прослойки между металлом и полупроводником часто используют слой

оксида, например диоксид кремния. Такие структуры носят название

МОП-структур. Металлический электрод обычно наносят на диэллектрик

вакуумным распылением. Этот электрод называется затвором.

Если на затвор подать некоторое напряжение смещения относительно

полупроводника , то у поверхности полупроводника возникает область

объемного заряда, знак которой противоположен знаку заряда на затворе.

В этой области концентрация носителей тока может существенно

отличаться от их объемной концентрации.

Заряжение приповерхностной области полупроводника приводит к

появлению разности потенциалов между нею и объемом полупроводника и,

следовательно, к искривлению энергетических зон. При отрицательном

заряде на затворе, энергетические зоны изгибаются вверх, так как при

перемещении электрона из объема на поверхность его энергия

увеличивается. Если затвор заряжен положительно то зоны изгибаются

вниз.

Hа рисунке 1 показана зон-

ная структура n-полупроводни-

ка при отрицательном заряде на

затворе и приведены обозначе-

ния основных величин, характе-

ризующих поверхность; -раз-

ность потенциалов между повер-

хностью и объемом полупровод-

ника; - -изгиб зон у повер-

хности; ................. -се-

редина запрещенной зоны. Из

рисунка 2 видно, что в объеме

полупроводника расстояние от

дна зоны проводимости до уров-

ня Ферми меньше расстояния от

уровня Ферми до потолка вален-

тной зоны. Поэтому равновес-

ная концентрация электронов

больше концентрации дырок: как

и должно быть у n-полупровод-

ников. В поверхностном слое

объемного заряда происходит

искревление зон и расстояния

от дна зоны проводимости до

уровня Ферми по мере перемеще-

ния к поверхности непрерывно

увеличивается, а расстояние до

уровня Ферми до потолка вален-

тной зоны непрерывно

уменьшается. В сечении АА эти

расстояния становятся одинако-

выми (..................) и

полупроводник становится соб-

ственным: n=p=n. Правее сече-

ния АА ............. , в сед-

ствии чего p>n и полупровод-

ник становится полупроводни-

ком р-типа. У поверхности об-

разуется в этом случае повер-

хностный p-n переход.

Часто изгиб зон у поверх-

ности выражают в единицах kT

и обозначают Ys. Тогда ....................... .

При формировании приповерхностной области полупроводника могут

встретиться три важных случая: обеднение, инверсия и обогащение этой

области носителями заряда. Эти случаи для полупроводников n- и p-типа

представлены на рис. 3.

Обедненная область появляется в том случае, когда заряд затвора

по знаку совпадает со знаком основных носителей тока (рис.3 а,г). Выз-

ванный таким зарядом изгиб зон приводит к увеличению расстояния от

уровня Ферми до дна зоны проводимости в полупроводнике n-типа и до

вершины валентной зоны в полупроводнике p-типа. Увеличение этого рас-

стояния сопровождается обеднением приповерхностной области основными

носителями. При высокой плотности заряда затвора, знак которого совпа-

дает со знаком заряда основных носителей, по мере приближения к повер-

хности расстояние от уровня Ферми до потолка валентной зоны в полупро-

воднике n-типа оказывается меньше расстояния до дна зоны проводимости.

Вследствии этого, концентрация неосновных носителей заряда /дырок/ у

поверхности полупроводника становится выше концентрации основных носи-

телей и тип проводимости этой области изменяется, хотя и электронов и

дырок здесь мало, почти как в собственном полупроводнике. У самой по-

верхности, однако, неосновных носителей может быть столько же или да-

же больше, чем основных в объеме полупроводника. Такие хорошо проводя-

щие слои у поверхности с типом проводимости, противоположным объемно-

му, называют инверсионными (рис.3 б,д). К инверсионному слою вглубь от

поверхности примыкает слой обеднения.

Если знак заряда затвора противоположен знаку заряда основных но-

сителей тока в полупроводнике, то под его влиянием происходит притяже-

ние к поверхности основных носителей и обогащение ими приповерхностно-

го слоя. Такие слои называются обогащенными (рис. 4 в,е).

При слабом обогащении или обеднении приповерхностной области по-

лупроводника ее размер определяется так называемой дебаевской длинной

экранирования:

где: .......-диэлектрическая проницаемость полупроводника; ......

-концентрация основных носителей тока в нем.

а протяжении слоя ...... напряженность электрического поля, по-

тенциал и изменение концентрации носителей тока относительно объема

полупроводника уменьшается в ..... раз по сравнению с их значениями на

поверхности.

В случае сильного обеднения толщину обедненного слоя можно рассчи-

тать по формуле для обедненного слоя в барьере Шотки, заменив в ней

... на ... .

Наиболее сложно рассчитать структуру приповерхностного

слоя с инверсионной областью.

В интегральной электронике МДП-структуры широко используются для

создания транзисторов и на их основе различных интегральных микроcхем.

На рис. 4 схематически показана структура МДП-транзистора с изолиро-

ванным затвором. Транзистор состоит из кристалла кремния /например

n-типа/, у поверхности которого диффузией /или ионной имплантацией/ в

окна в оксиде формируются р-области, как показано на рис. 4 а. Одну из

этих областей называют истоком, другую - стоком. Сверху на них нано-

сят омические контакты. Промежуток между областями покрывают пленкой

металла, изолированной от поверхности кристалла слоем оксида. Этот

электрод транзистора называют затвором. Hа границе между р- и п-облас-

тями возникают два р-п-перехода - истоковый и стоковый, которые на ри-

сунке 4 а. показаны штриховкой.

Hа рис. 4 б приведена схема включения транзистора в цепь: к исто-

ку подсоединяют плюс, к стоку - минус источника напряжения .... , к

затвору - минус источника .... . Для простоты рассмотрения будем счи-

тать, что контактная разность потенциалов, заряд в оксиде и поверхнос-

тные состояния отсутствуют. Тогда свойства поверхностной области, в

отсутствие напряжения на затворе, ничем не отличаются от свойств по-

лупроводников в объеме. Сопротивление между стоком и истоком очень ве-

лико, так как стоковый р-п-переход оказывается под обратным смещением.

Подача на затвор отрицательного смещения сначала приводит к образова-

нию под затвором обедненной области, а при некотором напряжении .....

называемом пороговым, - к образованию инверсионной области, соединяю-

щей р-области истока и стока проводящим каналом. При напряжениях на

затворе выше ...... канал становится шире, а сопротивление сток-исток

- меньше. Рассматриваемая структура является, таким образом,

УПРАВЛЯЕМЫМ РЕЗИСТОРОМ.

Однако сопротивление канала определяется только напряжением на

затворе лишь при небольших напряжениях на стоке. С увеличением .....

носители из канала уходят в стоковую область, обедненный слой у стоко-

вого n-p-перехода расширяется и канал сужается (рис. 4,в). Зависи-

мость тока ..... от напряжения на стоке ....... становится нелинейной.

При сужении канала число свободных носителей тока под затвором

уменьшается по мере приближения к стоку. Чтобы ток в канале был одним

и тем же в любом его сечении, электрическое поле вдоль канала должно

быть, в таком случае, неоднородным, его напряженность должна расти по

мере приближения к стоку. Кроме того, возникновение градиента концен-

трации свободных носителей тока вдоль канала приводит к возникновению

диффузионной компоненты плотности тока.

При некотором напряжении на стоке ........ канал у стока перекры-

вается, при еще большем смещении канал укорачивается к истоку (рис.

4,г). Перекрытие канала однако не приводит к исчезновению тока стока,

поскольку в обедненном слое, перекрывшем канал, электрическое поле тя-

нет дырки вдоль поверхности. Когда носители тока из канала вследствии

диффузии попадают в эту область, они подхватываются полем и перебрасы-

ваются к стоку. Таким образом, по мере увеличения напряжения на стоке

чисто дрейфовый механизм движения носителей тока вдоль канала сменяет-

ся диффузионно-дрейфовым.

Механизм протекания тока в МДП-транзисторе при сомкнутом канале

имеет некоторые общие черты с протеканием тока в обратно-смещенном

n-p-переходе. Напомним, что в n-p-переходе неосновные носители тока

попадают в область пространственного заряда перехода вследствие диффу-

зии и затем подхватываются его полем.

Как показывают теория и эксперимент, после перекрытия канала ток

стока ....... практически насыщается (рис. 5). Значение тока насыще-

ния зависит от напряжения на затворе .....: чем выше ..... , тем шире

канал и тем больше ток насыщения (на рисунке ......................).

Это типично транзисторный эффект - напряжением на затворе (во входной

цепи) можно управлять током стока (током в выходной цепи). Характер-

ной особенностью МДП-транзисторов является то, что его входом служит

конденсатор, образованный металлическим затвором, изолированным от по-

лупроводника. Ток утечки затвора типичных МДП-транзисторов составляют

........А и могут быть уменьшены до ......А. В рассматриваемом тран-

зисторе используется эффект поля, поэтому такие транзисторы называют-

ся ПОЛЕВЫМИ. В отличии от транзисторов типа p-n-p или n-p-n, в кото-

рых происходит инжекция неосновных носителей тока в базовую область, в

полевых транзисторах ток переносится только основными носителями. Поэ-

тому такие транзисторы называются также УНИПОЛЯРНЫМИ.

На границе раздела полупроводник - диэллектрик в запрещенной зо-

не полупроводника существуют энергетические состояния, называемые по-

верхностными или, точнее, состояниями граници раздела (рис. 6). Волно-

вые функции электронов в этих состояниях локализованы вблизи повер-

хности раздела в областях порядка постоянной решетки. Причина возник-

новения рассматриваемых состояний состоит в неидеальности граници раз-

дела полупроводник - диэллектрик (оксид). На реальных границах разде-

ла всегда имеется некоторое количество оборванных связей и нарушается

стехиометрия состава оксидной пленки диэллектрика. Плотность и харак-

тер состояний граници раздела существенно зависят от технологии созда-

ния диэллектрической пленки.

Наличие поверхностных состояний на границе раздела полупроводник

- диэллектрик отрицательно сказывается на параметрах МДП-транзистора,

так как часть заряда, наведенного под затвором в полупроводнике, зах-

ватывается на эти состояния. Успех в создании полевых транзисторов

рассматриваемого типа был достигнут после отработки технологии созда-

ния пленки ....... на поверхности кремния с малой плотностью состоя-

ний границы раздела .......... .

В самом оксиде кремния всегда существует положительный "встроен-

ный" заряд, природа которого до сих пор до конца не выяснена. Значе-

ние этого заряда зависит от технологии изготовления оксида и часто

оказывается настолько большим, что если в качестве подложки ис-

пользуется кремний р-типа проводимости, то у его поверхности образует-

ся инверсионный слой уже при нулевом смещении на затворе. Такие тран-

зисторы называются транзисторами со ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ. Канал в них

сохраняется даже при подаче на затвор некоторого отрицательного смеще-

ния. В отличие от них в транзисторах, изготовленных на п-подложке, в

которой для образования инверсионного слоя требуется слишком большой

заряд оксида, канал возникает только при подаче на затвор напряжения

....., превышающего некоторое пороговое напряжение ....... . По знаку

это смещение на затворе должно быть отрицательным для транзисторов с

п-подложкой и положительным в случае р-подложки.

К униполярным транзисторам относят также транзисторы с управляю-

щим п-р-переходом, структуру которых схематически представлена на рис.

7,а. Канал проводимости в таких транзисторах представляет собой узкую

область в исходном полупроводнике, не занятую обедненным слоем п-р-пе-

рехода. Шириной этой области можно управлять, подавая на п-р-переход

обратное смещение. В зависимости от этого смещения меняется начальное

сопротивление сток-исток. Если при неизменном напряжении на р-п-пере-

ходе смещение сток-исток увеличивать, канал сужается к стоку и ток

стока растет с напряжением медленнее, чем при малых смещениях. При пе-

рекрытии канала (рис. 7,б) ток стока выходит на насыщение. Как меха-

низм протекания тока по каналу такого транзистора, так его выходные

характеристики весьма близки к характеристикам МДП-транзистора.

Входное сопротивление полевых транзисторов на низких частотах яв-

ляется чисто емкостным. Входная еикость ..... образуется затвором и

неперекрытой частью канала со стороны истока. Так как для заряда этой

емкости ток должен протекать через неперекрытую часть канала с сопро-

тивлением ....... , то собмтвенная постоянная времени транзистора рав-

на .......... . Это время, однако, очень мало , и в интегральных схе-

мах, применяемых, например, в цифровой вычислительной технике, дли-

тельность переходных процессов определяется не им, а паразитными ем-

костями схемы и входными емкостями других транзисторов, подключенных к

выходу данного. Вследствии этого при изготовлении таких схем стремят-

ся сделать входную емкость как можно меньшей за счет уменьшения длин-

ны канала и строгого совмещения границ затвора с границами стока и ис-

тока.

При больших напряжениях на стоке МДП-транзистора область объемно-

го заряда от стоковой области может распространиться настолько сильно,

что канал вообще исчезнет. Тогда к стоку устремятся носители из сильно

легированной истоковой области, точно так же как при "проколе" базы

биполярного транзистора (см "Твердотельная электроника" Г.И.Епифанов,

Ю.А.Мома #12.2 и рис.12.19).

При достаточно большом напряжении на стоке может также возник-

нуть обычный пробой обратносмещенного стокового р-п-перехода. Выход-

ные характеристики МДП-транзистора , включающие участки пробоя, пред-

ставлены на рис. 8.

\_\_.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_F\_<\_\_\_\_D:\EDITORS\WD\1.FRM-\_\_єy▌;№;\_4Ч6ж\_h\_R\_MIч58√Cщь$kзя\_ь-P:SЫ\_\*.MACC\_

вэМГn■\_т^P┬√M  
Мя\_\_\_@∙J№цTч┴·DL▄■ыш├:┬ОE¤╥.\_\_ф\_бr АДЮяз╞#                                        \_