

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

Кафедра физической электроники

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ
"ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА"

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА К ЗАДАЧЕ: "ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ"

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структур в микроэлектронике, непрерывное совершенствование планарной технологии ставят задачи создания более совершенных диэлектрических слоев и, что не менее важно, устранения отрицательного влияния границы раздела диэлектрик-полупроводник на параметры приборов, использующих упомянутые структуры.

Одним из таких приборов является так называемый "полевой" транзистор, принцип действия которого основан на уникальных свойствах МДП-структур изменять продольную проводимость в тонком слое полупроводника в зависимости от приложенного поперечного поля. Эффективность управления проводимостью слоя полупроводника в сильной степени зависит от того, какая доля носителей будет локализована на поверхностных состояниях (уровнях, возникающих в полупроводнике вблизи его поверхности вследствие обрыва кристаллической решетки и других несовершенств границы раздела). Поэтому дальнейшее совершенствование приборов на базе МДП-структур связано с более тщательным изучением свойств границ раздела полупроводник-диэлектрик, что в свою очередь требует применения хорошо разработанных экспериментальных методик.

Одной из них является метод $C-V$ характеристик, дающий возможность с большой точностью определять величину плотности поверхностных состояний.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ C-V МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Метод основан на сравнении C-V характеристик идеальной и реальной МДП-структур. В идеальной МДП структуре предполагается отсутствие поверхностных состояний и локализованных зарядов в объеме. Полный расчет C-V характеристики идеальной МДП-структуры приведен в /1/. Поскольку в задаче для измерения емкости используются только высокочастотные сигналы ($f \sim 1$ МГц), то нас в дальнейшем будут интересовать лишь области обеднения и слабого обогащения носителями. В областях инверсии и сильного обогащения при ВЧ-методе практически не происходит изменения полной емкости и они исключаются из рассмотрения.

На рис. 1 приведен разрез МДП-структуры (а) и ее эквивалентная схема (б). (стр. 12).

В /1/ подробно рассматриваются физические процессы, происходящие в подобных структурах при приложении напряжения V , а также получены выражения для вычисления величин C_s и V в зависимости от задаваемого изгиба зон φ_s для идеальной МДП-структуры. При этом φ_s изменяется в пределах, соответствующих режимам слабого обогащения и обеднения слоя полупроводника основными носителями.

Для случая, когда используется полупроводник p-типа формулы имеют следующий вид /1/:

$$C_s = \frac{\epsilon_s \epsilon \lambda^{1/2}}{2L_D} \left| \frac{1 - e^{-\varphi_s}}{(e^{-\varphi_s} + \gamma_s - 1)^{1/2}} \right| \quad (1)$$

$$C = \frac{C_s \cdot C_d}{C_s + C_d} \quad (2)$$

$$V = \varphi_s - \frac{Q_s}{C_d} \quad (3)$$

Где

$$Q_s = -\frac{y_s}{|y_s|} \cdot 2n_i |q| \cdot L_D \cdot \lambda^{1/2} (e^{-y_s} + y_s - 1)^{1/2} \quad (4)$$

(Первый множитель в выражении (4) $\frac{y_s}{|y_s|}$ определяет знак Q_s : если зоны изгибаются вниз, т.е. y_s положительное, то Q_s отрицателен и наоборот). Здесь q - заряд электрона, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\lambda = \frac{p_0}{n_i}$, p_0 - концентрация дырок; n_i - концентрация носителей в собственном полупроводнике, $y_s = \frac{|q| \cdot \varphi_s}{kT}$ - загиб зон, выраженный в единицах $\frac{kT}{|q|}$, L_D - дебаевская длина экранирования, равная

$$L_D = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon kT}{2q^2 \cdot n_i} \right)^{1/2}$$

Выражения 1,2,3,4 предполагают знание n_i , которая входит в L_D и λ .

Подставив в (1,2,3,4) L_D и λ и учитывая, что сравнение $C-V$ характеристики идеальной структуры будет проводиться с $C-V$ характеристикой реальной структуры площадью S (в формулах 1,2,3,4 величины C_s, C_d, Q_s, C - удельные) получим выражения для C_s^*, C_d^*, Q_s^* идеальной МДШ структуры площадью S , в которых отсутствует n_i .

$$C^* = \frac{C_s^* C_d^*}{C_s^* + C_d^*} \quad (5)$$

$$C_s^* = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot q^2 p_0}{2kT} \right)^{1/2} \left| \frac{1 - e^{-y_s}}{(e^{-y_s} + y_s - 1)^{1/2}} \right| \cdot S \quad (6)$$

$$V = y_s \frac{kT}{|q|} - \frac{Q_s^*}{C_d^*} \quad (7)$$

где C_d^* - емкость, обусловленная диэлектрической прослойкой исследуемой структуры; определяется по значению максимальной емкости экспериментальной $C-V$ характеристики.

$$Q_s^* = -\frac{y_s}{|y_s|} \cdot [2\epsilon_0\epsilon kT p_0 (e^{-y_s} + y_s - 1)]^{1/2} \cdot S \quad (8)$$

По аналогии для структуры с полупроводником n -типа имеем:

$$C^* = \frac{C_s^* \cdot C_d^*}{C_s^* + C_d^*} \quad (9)$$

$$C_s^* = \left(\frac{\epsilon_0\epsilon q^2 n_0}{2kT} \right)^{1/2} \cdot \left| \frac{1 - e^{y_s}}{(e^{y_s} - y_s - 1)^{1/2}} \right| \quad (10)$$

$$V = y_s \frac{kT}{|q|} - \frac{Q_s^*}{C_d^*} \quad (11)$$

$$Q_s = -\frac{y_s}{|y_s|} \cdot [2 \cdot \epsilon_0\epsilon kT n_0 (e^{y_s} - y_s - 1)]^{1/2} \cdot S \quad (12)$$

Здесь n_0 - равновесная концентрация электронов в полупроводнике n -типа.

После получения экспериментальной $C-V$ характеристики определяется C_d^* , используя формулы 5-8, 9-12 рассчитываем $C^* = C^*(V)$ соответственно для полупроводников p и n -типов.

2. ОБЛАСТЬ ЗАДАНИЯ y_s

При приложении к МДП-структуре напряжения V все энергетические уровни (в том числе и поверхностные состояния) на поверхности сдвигаются на величину φ_s , равную падению напряжения в приповерхностном слое полупроводника. Эффективная перезарядка поверхностных состояний происходит при их пересечении с уровнем Ферми. При использовании ВЧ метода получения $C-V$ кривых, который оказывается непригодным при образовании инверсного слоя в полупроводнике, изгиб зон в режиме обеднения не должен превышать значения, при котором уровни, соответствующие середине запрещенной зоны пересекает уровень Ферми. Для легированных полупроводников расстояние уровня Ферми от зон составляет небольшую величину

($\sim 0,01$ эВ) по сравнению с шириной запрещенной зоны, которая для германия и кремния при комнатной температуре соответственно равна $0,67$ эВ и $1,1$ эВ. Поэтому изучение поведения емкости в режиме обеднения в первом приближении может давать информацию о распределении поверхностных состояний в верхней половине запрещенной зоны n -полупроводника и в нижней p -полупроводника. Если используются одинаковые полупроводники, но с разными примесями (p или n), то их раздельное изучение позволяет судить о распределении поверхностных уровней по всей зоне.

В [1] даны более строгие оценки для y_s , при которых еще справедливы выражения для C_s в режиме обеднения.

Для p -полупроводника должно соблюдаться следующее условие:

$$y_s - 1 > e^{y_s} \lambda^{-2} = e^{y_s} \cdot \frac{n_i^2}{p_0^2}; \quad (13)$$

в случае n -полупроводника

$$-y_s - 1 > e^{-y_s} \lambda^2 = e^{-y_s} \cdot \frac{n_i^2}{n_0^2} \quad (14)$$

Легко видеть, что при $p_0 = n_0$ (при одинаковом легировании p и n примесью) с учетом знаков y_s условия становятся одинаковыми. Для кремния ($n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$) с концентрацией примеси 10^{21} м^{-3} указанные неравенства справедливы вплоть до $|y_s| = 25$, что соответствует изгибу уровней на величину $\sim 0,6$ эВ. Это несколько превышает половину E_g - ширины запрещенной зоны кремния ($E_{gsi} = 1,1$ эВ). Аналогичные оценки y_s для Ge с тем же уровнем легирования дают величину $|y_s| = 9$.

В области обогащения, когда полная емкость МДП структуры становится практически равной C_d , определение сдвига ΔV экспериментальной $C-V$ кривой относительно расчетной приводит к большим ошибкам. Поэтому обычно задают y_s , таким что-

бы значение C^* не превышало $\sim 0,9 C_{\text{max}}^*$ ($C_{\text{max}}^* = C_{\text{cl}}^*$)

Для образцов S_i , используемых в задаче это соответствует $|y_s| = 3$. При этом исследуется область запрещенной зоны лежащая между уровнем Ферми и краем зоны.

3. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ.

В /I/ приведена формула для расчета плотности поверхностных состояний:

$$N_{ss}(\psi_s) = \frac{C_d}{q^2} \cdot \frac{d(\Delta V)}{d\psi_s} \quad (I5)$$

где ΔV - сдвиг по оси напряжений экспериментальной $C-V$ кривой относительно теоретической. Величина N_{ss} представляет собой количество поверхностных уровней, приходящееся на единичный интервал энергий для площади в 1 м^2 . Необходимо заметить, что все формулы, приведенные выше требуют подстановки величин, выраженных в системе СИ. Обычно N_{ss} выражают в единицах $\text{м}^{-2} \text{эВ}^{-1}$. Тогда формула для N_{ss} преобразуется следующим образом:

$$N_{ss}(\psi_s) = \frac{C_d^*}{S \cdot |q|} \cdot \frac{d(\Delta V)}{d\psi_s} \quad (I6)$$

В (I6) вместо удельной емкости C_d подставлено ее значение, выраженное через известные C_d^* и S . Практически для получения N_{ss} поступают следующим образом. В одном масштабе строят экспериментальную и теоретическую $C-V$ кривые (рис.2). (стр.12). На теоретической кривой берут емкости C^* для различных ψ_s , а следовательно и V), проводят через эти точки параллельные оси прямые до пересечения с экспериментальной кривой и находят сдвиг по оси V экспериментальной кривой относительно теоретической $-\Delta V(\psi_s)$. Затем строят кривую $\Delta V(\psi_s)$ и находят производную $\frac{d(\Delta V)}{d\psi_s}$ при тех же значениях ψ_s . Используя (I6) легко найти N_{ss} как функцию ψ_s . Может оказаться, что $\Delta V(\psi_s)$ будет представлять линейную функцию. Это означает, что поверхност-

ные состояния равномерно распределены по запрещенной зоне. В противном случае, следует более детально рассмотреть распределение поверхностных состояний по запрещенной зоне. При этом необходимо учесть соображения, представленные в п.2 настоящего описания.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СЪЕМА ХАРАКТЕРИСТИК

$C-V$ зависимости можно измерять с помощью ВЧ мостовых или резонансных измерителей емкости. В настоящей работе используется получивший широкое распространение метод автоматического съема

$C-V$ характеристик, (рис.3). (стр.12).

Высокочастотный сигнал ($f = 1$ МГц, и $U = 50-100$ мВ) поступает от генератора 1 (Г4-102) на исследуемую МШИ структуру с емкостью C_1^* , которая с помощью переключателя может быть заменена на структуру C_2^* . Этим же переключателем к гнездам 1,2 может быть подключена либо "0"-ая емкость, либо калибровочная емкость (50пф), что необходимо для градуировки прибора. C_p - разделительная емкость, которая предотвращает попадание постоянного напряжения на выход генератора. Последовательно с C^* включено небольшое активное сопротивление R ($R \ll \frac{1}{\omega C^*}$). При этом падающее на R напряжение U_R оказывается пропорциональным C^* . С сопротивления R сигнал поступает на вход усилителя с детектором 2, в качестве которого используется ламповый милливольтметр В 3-6.

С выхода В3-6 усиленный сигнал подается на вход "У" двухкоординатного самописца 3. На вход "Х" от генератора 4 подается линейноменяющееся напряжение, которое одновременно подключено к исследуемой МШИ структуре. Поэтому на самописце автоматически получается экспериментальная кривая $C^*(V)$. Разделительная индуктивность L_p служит для устранения влияния ВЧ сигнала на генератор линейно меняющегося напряжения 4.

5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В качестве объектов исследования выбраны МДП структуры на основе Р и П кремния, в которых в качестве диэлектрических прослоек используются окисленные слои кремния (так называемые МОП-структуры). Сверху окисла напылены круглые электроды из *Al* диаметром $\sim 0,5$ мм, один из которых используется в качестве электрического контакта МОП-структуры. Вторым контактом служит напыленная на нижнюю сторону пластинки монокристалла кремния алюминиевая пленка. При пробое МОП структуры прижимной электрод перемещают на следующий круглый контакт и т.д.

В держателе имеется возможность установки 2-х объектов одновременно, в качестве которых, как уже отмечалось, в задаче используются МОП структуры на основе Р и П кремния.

6. ПОДГОТОВКА АППАРАТУРЫ К РАБОТЕ.

1. Включить сетевой тумблер генератора Г4-102. Установить на нем частоту 1 мГц, выбрав для этого с помощью переключателя необходимую шкалу.

Выходной сигнал должен сниматься с разъема " μV ". С помощью переключателя и потенциометра установить амплитуду выходного сигнала ~ 100 мВ. При этом тумблер подключающий выход " μV " должен находиться в положении "вкл."

2. С помощью тумблера "Сеть" включить питание блока пилообразного напряжения. Тумблер "Вкл.развертки" должен находиться в нижнем положении (развертка выключена). Тумблеры в нижней части передней панели находятся в следующих положениях: крайний левый и крайний правый тумблеры в положении "Вкл", тумблеры *V-A* - в положении *V*. В этом случае на схему, вырабатывающую линейно

изменяющееся напряжение подано питание и она готова к запуску. При этом стрелочные приборы должны показывать напряжение $\sim 25 V$.

3. Включить сетевой тумблер лампового милливольтметра ВЗ-6 и дать возможность прогреться прибору в течение ~ 10 мин. Тумблер " $V-mV$ " установить в положение " mV ". Переключатель, определяющий чувствительность прибора, рекомендуется поставить в положение $5 mV$. Калибровку милливольтметра производить не обязательно, поскольку в дальнейшем вся аппаратура калибруется по стандартным емкостям.

4. Включение и настройка двухкоординатного самописца. Переключатель $\odot \odot$ поставить в положение \odot . Тем самым прибор подключается к сети. Исходное положение переключателя Par .

F - крайнее левое. Дать возможность прогреться прибору в течение 10 мин. Ось "X": Переключатель $mV/cm - V/cm$ - в положении $1 V/cm$ или $2 V/cm$ в зависимости от размера листа миллиметровки). Переключатель " $Var-VarO-Cal-CalO-pot$ " поставить в положение " Cal ". В этом случае чувствительность самописца по оси "X" строго соответствует $1 V/cm$ (или $2 V/cm$) и не поддается регулировке потенциометром " Var ". С помощью потенциометра " $\leftarrow o \rightarrow$ " осуществляется выбор исходного положения пера самописца. Переключатель " $0... 10$ " осуществляет грубое смещение нуля и в данной работе не используется. Он должен находиться в положении " 0 ".

Ось "Y": Переключатель $mV/cm - V/cm$ рекомендуется поставить в положение $10 mV/cm$ или $20 mV/cm$, Переключатель $Var - VarO - Cal - CalO - pot$ установить в положение " Var ". При этом с помощью потенциометра " Var " можно плавно изменять чувствительность самописца по оси "Y".

Регулировка \updownarrow осуществляет, как и ранее, выбор исходного положения пера. Как и в случае оси "X" переключатель " $0... 10$ "

должен находиться в положении "0".

ВНИМАНИЕ! Группа переключателей "*Zeitbasisgeber*" предназначена для задания временной развертки по оси "X" и в настоящей задаче не используется.

7. СНЯТИЕ C-V ХАРАКТЕРИСТИК

На координатную плоскость самописца кладется лист миллиметровой бумаги, после чего переключатель "*Par-F*" переводится из крайнего левого положения в положение "*Par*", при котором включается электростатический прижим бумаги. Для лучшего сцепления бумаги следует несколько раз разгладить ее рукой.

После этого переключатель расположенный на кожухе держателя МДП-структур, поочередно ставится в положение "0" пф или 50пф и одновременно с этим выбирается необходимая чувствительность прибора на оси "Y" с помощью регулировки "*Var*" и осуществляется выбор исходного положения пера самописца. Желательно получить максимально возможное расстояние между положениями в "0" и 50 пф. Индикатором прохождения ВЧ сигнала через емкость может служить также увеличение показаний стрелочного прибора ВЗ-6 при подключении емкости 50 пф.

Добившись указанной настройки ставят риски на бумаге в положениях пера в "0" и "50пф". Тем самым осуществляется калибровка аппаратуры необходимая для измерения емкости. Положение того же переключателя "калибр" служит для калибровки милливольтметра ВЗ-6 в которой нет необходимости. Поэтому в работе положение "калибр" не используется.

Затем переключатель на кожухе держателя МДП структур переводится в положение "МДП I" и с помощью тумблера "вкл.развертки", расположенного на передней панели блока пилообразного напряжения

запускается развертка. Если $C-V$ кривая не выходит за формат бумаги, то тумблер "вкл.развертки" ставят в прежнее положение, возвращая тем самым перо самописца в начальное состояние. С помощью регулировки "Длительность развертки" (расположена на передней панели блока пилообразного напряжения) устанавливают ее максимальную длительность (крайнее левое положение). Переключатель на панели самописца "*pap.-F*" ставят в положение "*F*", при котором происходит опускание пера. Включают развертку и производят запись характеристики структуры МДП I. После этого переключатель "*pap.-F*" возвращают в "*pap.*", тумблер "Вкл.развертки" переводят в нижнее положение. Переключатель "калибр." - Опф-50пф-МДП I - МДП II ставят в положение МДП II и, повторив соответствующие операции, получают кривую для второй структуры.

По окончании выполнения задачи в обратной последовательности выключают все приборы. Для предотвращения высыхания пера необходимо закрыть его колпачком!

Литература:

1. Практикум по твердотельной электронике.

Под ред. В.И.Петрова и Г.В.Спивака.

Изд-во МГУ, 1984г.

(В теоретической части описания этой задачи на сайте практикума)

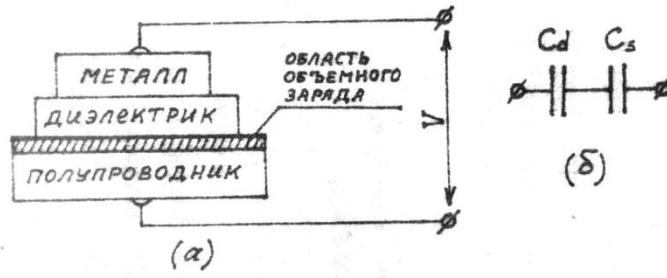


Рис. 1

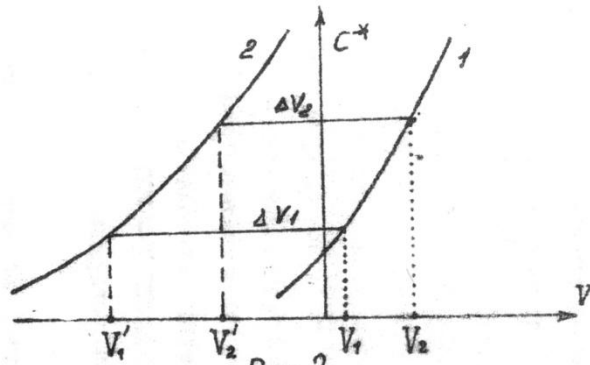


Рис. 2.

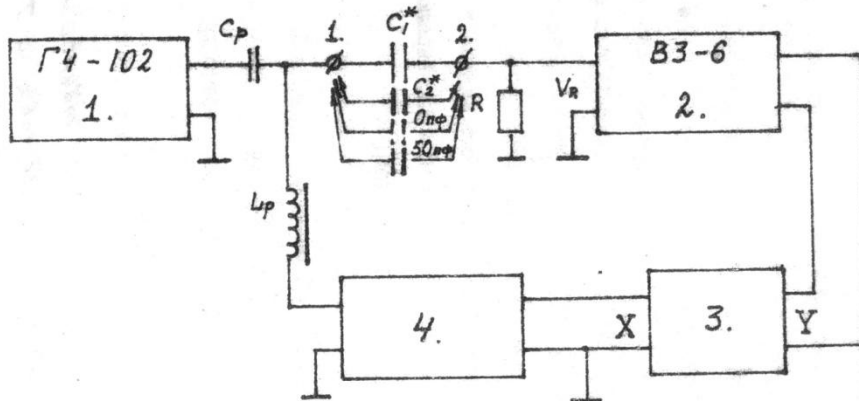


Рис. 3

ЗАДАНИЕ :

1. Получить экспериментальные $C-V$ -характеристики для 2-х типов МДШ структур изготовленных на основе p - и n - кремния. Напряжение V автоматически изменяется в пределах от -15 до 15 В и не поддается регулировке.

2. Рассчитать теоретические $C-V$ характеристики МДШ структур для p и n кремния. Концентрацию носителей в p и n полупроводниках считать одинаковой:

$$p_0 = n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

Диэлектрическая постоянная кремния $\epsilon = 13$. Диаметр верхнего электрода МДШ структуры $D = 5 \cdot 10^{-4}$ м. Область задания изгиба энергетических уровней ψ ; обсуждалась в п.3.

Для p - полупроводника ψ_s рекомендуется задавать в пределах от -3 до $+20$, а для n -полупроводника - от $+3$ до -20 с интервалом 1 .

3. По изложенной выше методике рассчитать $N_{SS}(\psi_s)$ для полупроводников p и n -типов.

4. С помощью полученной зависимости $N_{SS}(\psi_s)$ проанализировать распределение поверхностных состояний по запрещенной зоне полупроводников p и n -типов.

При сдаче задачи необходимо представить:

1) Экспериментальные $C-V$ кривые для p и n полупроводников.

2) расчет $C^*(V)$

3) Результаты обработки $N_{SS}(\psi_s)$