

Министерство науки и образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
МЕТАЛЛ - ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК

РУКОВОДСТВО
к лабораторной работе по курсу
«Физические основы микро- и наноэлектроники»
для студентов, обучающихся по направлению
11.03.03 - «Конструирование и технология электронных средств»

Разработчики

доценты каф. КУДР

_____ М.М Славникова

_____ М.Н. Романовский

1. ВВЕДЕНИЕ

Структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) является основой для изготовления приборов с переносом заряда, полевых транзисторов с изолированным затвором, элементов памяти, твердотельных матричных видеоканалов и др. Во всех этих приборах используется изменение заряда в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего поля или других факторов.

Рассмотрим область пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника n -типа проводимости в зависимости от напряжения на металлическом электроде МДП-структуры (рис. 1.1.). ОПЗ может находиться в трех режимах.

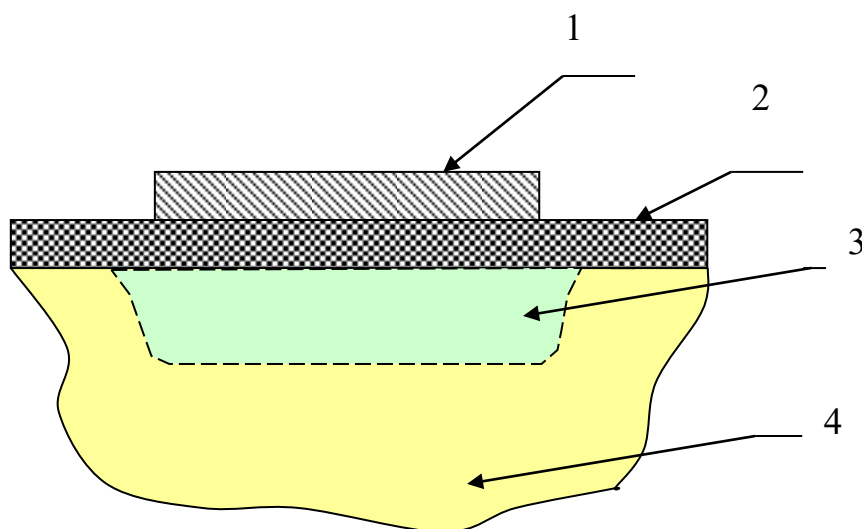


Рисунок 1.1. Структура металл-диэлектрик-полупроводник (1 - металлический электрод; 2 - диэлектрик; 3 - ОПЗ полупроводника; 4 - полупроводник).

При положительном напряжении на металлическом электроде свободные электроны из объема полупроводника притягиваются в ОПЗ, т.е. происходит обогащение поверхности полупроводника основными носителями заряда.

Me – Д – п/п *n* - типа

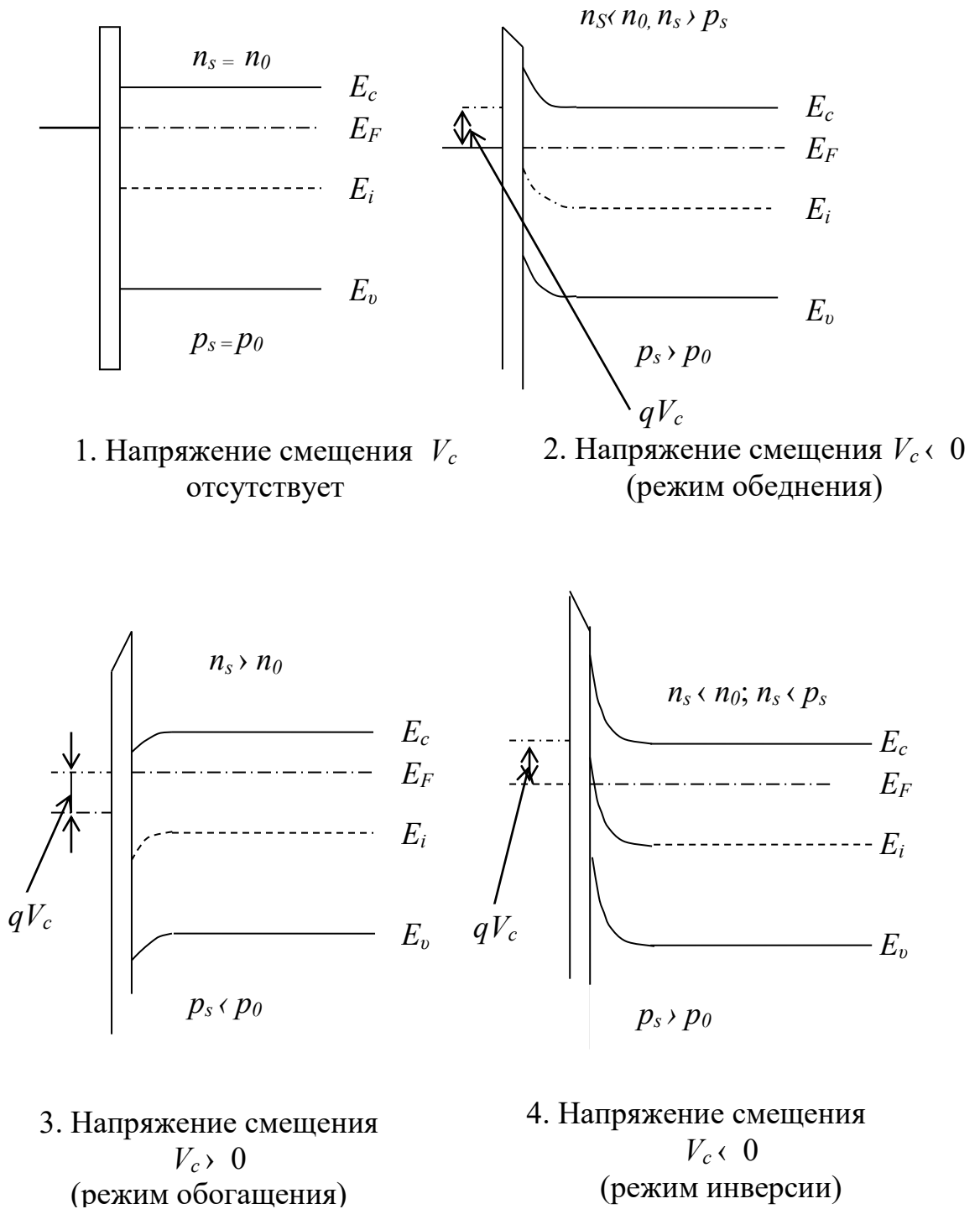


Рисунок 1.2. Энергетические зонные диаграммы идеальной МДП – структуры

При небольшом отрицательном смещении электроны выталкиваются из ОПЗ в объем, происходит обеднение поверхности основными носителями заряда. Отрицательный заряд металлического электрода компенсируется при этом положительным зарядом ионизованных доноров и свободных дырок в ОПЗ.

С ростом отрицательного напряжения ширина ОПЗ увеличивается, вместе с этим увеличивается концентрация свободных дырок вблизи поверхности. По достижении некоторого напряжения концентрация дырок непосредственно у поверхности превысит концентрацию электронов, т.е. на поверхности произойдет инверсия (изменение) типа проводимости. Дальнейший рост отрицательного напряжения не приводит к увеличению ширины ОПЗ. Увеличивается только концентрация дырок в инверсионном слое.

Рассмотренные состояния поверхности полупроводника *n*-типа иллюстрируют энергетические зонные диаграммы на рис. 1. 2.

В МДП – структуре на полупроводнике *p*-типа обогащение, обеднение и инверсия наблюдаются при другой полярности напряжения смещения.

В диэлектрике реальных МДП – структур обычно присутствует встроенный заряд (например, обусловленный ионами натрия). Кроме того, заряд несут энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника и диэлектрика вблизи границы раздела диэлектрик - полупроводник. Эти уровни (их называют поверхностными состояниями) могут возникать за счет загрязнения поверхности чужеродными атомами, а также из-за нарушения структуры диэлектрика и поверхности полупроводника. Заряд в диэлектрике и на поверхностных состояниях приводит к изгибу энергетических зон у поверхности полупроводника в отсутствие напряжения смещения.

Целью настоящей работы является изучение режимов обогащения, обеднения и инверсии в МДП – структуре и определение заряда в диэлектрике. Экспериментальная методика основана на измерении вольтфарадной характеристики МДП – структуры и сравнении ее с расчетной.

2. ВОЛЬТФАРАДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МДП–СТРУКТУРЫ

Малосигнальную емкость МДП – структуры C можно представить в виде двух последовательно включенных емкостей – емкости диэлектрика C_d и емкости ОПЗ $C_{п}$.

Результирующая емкость C определяется по правилу сложения обратных величин

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{п}}. \quad (2.1.)$$

Зависимость емкости МДП – структуры от напряжения смещения (см. рис.2.1) определяется изменением емкости ОПЗ, т.к. емкость диэлектрика от напряжения не зависит:

$$C_d = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.2)$$

где

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ ф/м;

d, ε - соответственно толщина и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S - площадь металлического электрода.

В режимах обогащения и сильной инверсии ОПЗ подобна проводнику ($C_{п} \gg C_d$), и емкость МДП – структуры равна емкости диэлектрика. В режиме обеднения емкость ОПЗ можно рассматривать как емкость конденсатора, диэлектриком которого служит слой ОПЗ, обедненный свободными носителями заряда. С ростом обедняющего напряжения эта емкость уменьшается из-за расширения ОПЗ, что приводит к уменьшению емкости МДП – структуры до минимального значения C_{min} .

В режиме инверсии скорость накопления неосновных носителей заряда у поверхности полупроводника определяется, в основном скоростью тепловой

генерации. На высоких частотах, когда скорость изменения измерительного сигнала больше, чем скорость тепловой генерации неосновных носителей заряда, инверсионный слой под действием измерительного сигнала изменяется слабо. В этих условиях емкость МДП – структуры равна C_{min} и не зависит от напряжения смещения (см. рис. 2.1, кривая 2), т.к. ширина ОПЗ, определяющая C_D , остается неизменной.

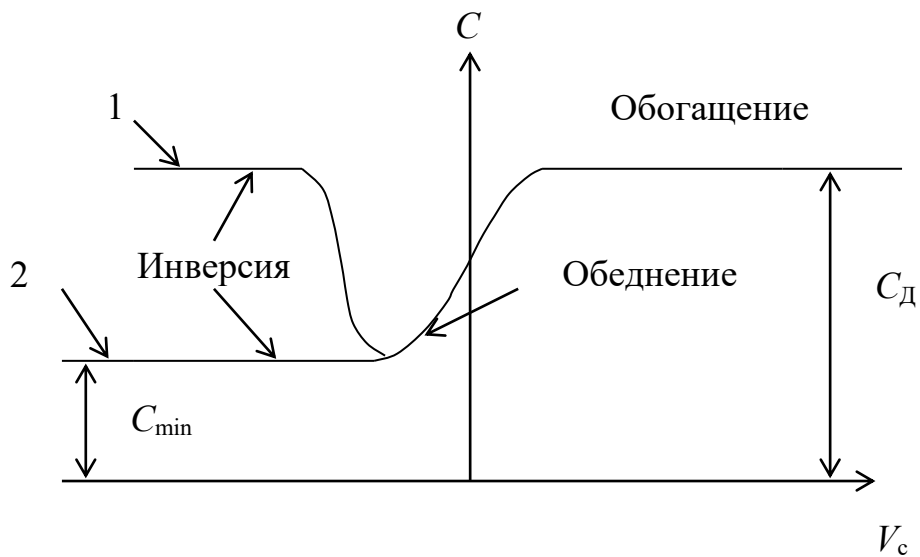


Рисунок 2.1. Вольтфарадная характеристика МДП – структуры на низкой (1) и высокой (2) частоте

На рис. 2.2. приведены вольтфарадные характеристики МДП – структуры алюминий-диоксид кремния-кремний (Al - SiO₂ – Si) при различных толщинах диэлектрика. Эти характеристики рассчитаны без учета заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях и разности работ выхода электронов из алюминия и кремния.

Экспериментальные кривые будут смещены относительно приведенных на рис.2.2 по оси напряжений. Величина смещения ΔV_s зависит от заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях (разность работ выхода электронов из алюминия и кремния очень мала). Плотность этого заряда связана с напряжением смещения ΔV_s выражением

$$Q_s = \frac{C_D \cdot \Delta V_s}{S} . \quad (2.3.)$$

Разделив поверхностную плотность заряда на заряд электрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), получим эффективную плотность поверхностных состояний

$$N_s = \frac{Q_s}{e} , \quad (2.4.)$$

Знак Q_s можно определить по направлению сдвига реальной вольтфарадной характеристики относительно расчетной: положительному заряду соответствует сдвиг в направлении отрицательных значений напряжения и наоборот.

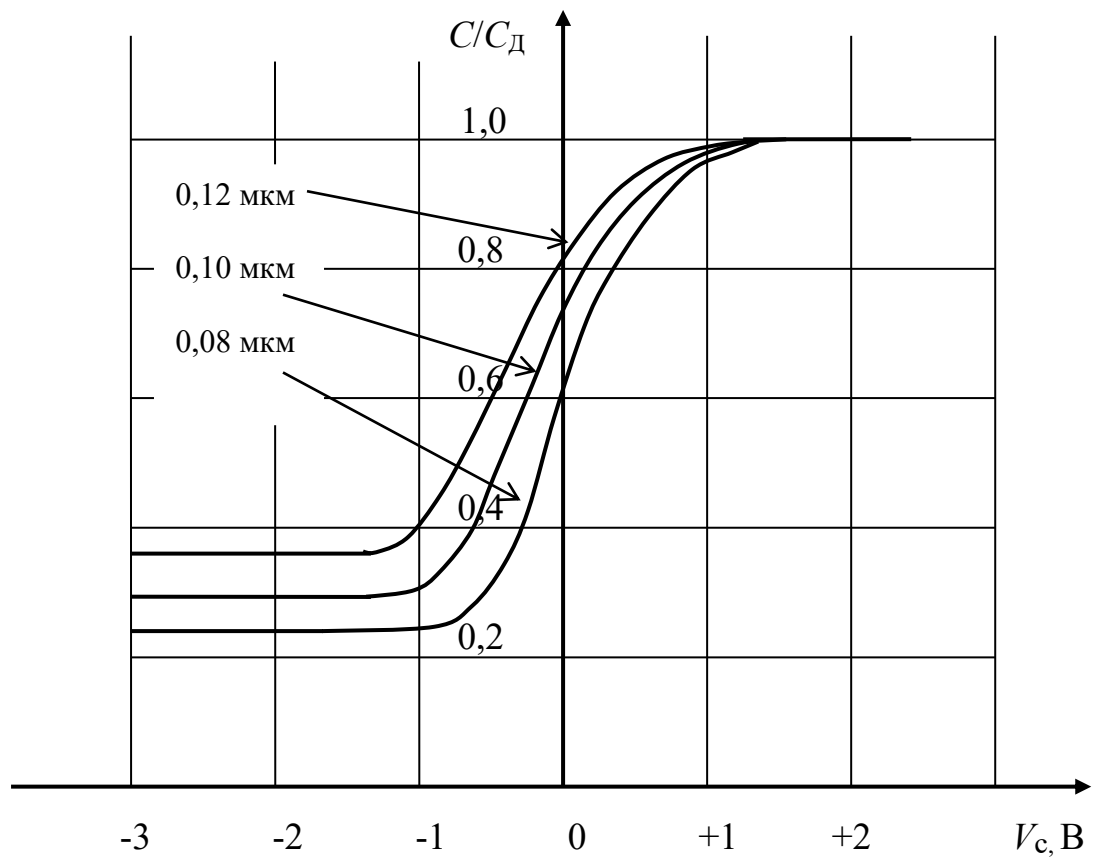


Рисунок 2.2. Вольтфарадные характеристики идеальной МДП – структуры при различных толщинах диэлектрика

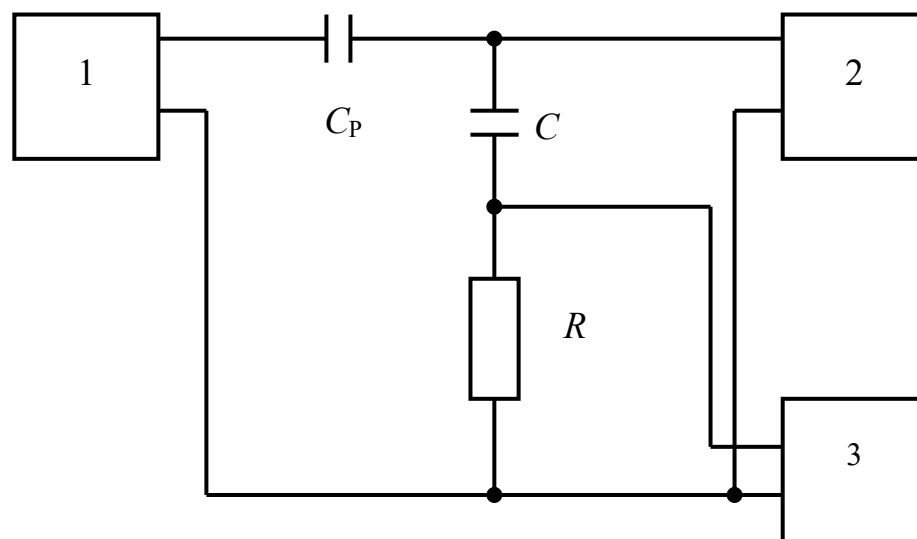
3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе измерение емкости МДП – структуры проводится методом делителя напряжения. Делитель образован емкостью МДП – структуры C и измерительным сопротивлением R (рис. 3.1).

С выхода высокочастотного генератора через разделительный конденсатор C_p на делитель подается синусоидальное напряжение (не более 25 мВ). Частота измерительного сигнала ω , C_p , R выбраны так, что

$$\omega \cdot C_p \gg \omega \cdot C \text{ и } R \ll \frac{1}{\omega \cdot C},$$

т.е. ток в измерительной цепи и, соответственно, падение напряжения на измерительном сопротивлении R определяются емкостью C . Прибор, регистрирующий падение напряжения на сопротивлении, проградуирован в единицах измерения емкости. Поэтому перед началом работы производится калибровка этого прибора, для чего вместо МДП – структуры подключается конденсатор известной емкости.



1 –высокочастотный генератор; 2 – источник постоянного напряжения; 3 – милливольтметр.

Рисунок 3.1. Структурная схема установки для измерения вольт-фарадных характеристик

Образец для исследования представляет собой структуру Al – SiO₂ – Si. При измерении вольтфарадной характеристики напряжение смещения следует изменять от + 5 до – 5 В. Отключение и подключение МДП – структуры необходимо производить при напряжении смещения равном нулю.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 4.1. Измерить вольтфарадную характеристику для предложенного образца.
- 4.2. По вольтфарадной характеристике определить емкость диэлектрика и по формуле (2.2) вычислить его толщину. Принять для диоксида кремния $\epsilon_d = 3,5$. Площадь затвора (металлического электрода) $S = \pi \cdot r^2$, где $r = 0,05$ см.
- 4.3. Построить экспериментальную и соответствующую ей теоретическую вольтфарадные характеристики в координатах $C/C_d = f(V)$.
- 4.4. По смещению экспериментальной $C(V)$ кривой относительно теоретической при $V=0$ рассчитать плотность поверхностного заряда и эффективную плотность поверхностных состояний в диэлектрике.
- 4.5. Определить тип проводимости полупроводника, знак заряда в диэлектрике и сформулировать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Что называют обогащением, обеднением, инверсией проводимости приповерхностного слоя полупроводника?
- 5.2. Объясните вид низко- и высокочастотной вольтфарадных характеристик МДП – структуры.
- 5.3. Что такое поверхностные состояния?
- 5.4. Каковы причины сдвига экспериментальной вольтфарадной кривой относительно теоретической?

- 5.5. Каким образом начальный изгиб энергетических зон на поверхности полупроводника влияет на величину и знак поверхностного заряда?
- 5.6. Как по вольтфарадной характеристике МДП – структуры определить тип проводимости полупроводника и емкость диэлектрика?
- 5.7. Объясните метод измерения емкости, используемый в настоящей работе.

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 6.1 Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Энергия, 1973, с. 347-383.
- 6.2 Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов.- М.: 1980. - 347 с.
- 6.3. Несмелов Н.С., Славникова М.М., Широков А.А. Физические основы микроэлектроники. Томск, ТУСУР, 2007. с. 276