

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.Н. Романовский
М.М. Славникова

ЭЛЕМЕНТЫ МДП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Интегральные устройства радиоэлектроники»

Томск
2022

УДК 621.382
ББК 32.844
Р 69

Рецензент

Еханин С.Г., профессор кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, докт. техн. наук

Романовский Михаил Николаевич, Славникова Марина Михайловна

Р 69 Элементы МДП интегральных схем: методические указания к лабораторной работе по дисциплине Интегральные устройства радиоэлектроники/ М.Н. Романовский, М.М. Славникова. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 10с.

Рассмотрены равновесные и неравновесные процессы в структурах металл – диэлектрик – полупроводник на кремнии. Приведены порядок выполнения работы, контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

УДК 621.382
ББК 32.844

© Романовский М.Н., 2022
© Славникова М.М., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 ИДЕАЛЬНЫЙ МДП - КОНДЕНСАТОР	4
3 РЕАЛЬНЫЙ МДП - КОНДЕНСАТОР.....	6
4 РЕЛАКСАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЕМКОСТИ.....	7
5 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	8
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	8
7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	9
ПРИЛОЖЕНИЕ А	10

1 ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые интегральные схемы (ИС) изготавливаются на основе биполярных структур и структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП). Основными элементами МДП ИС являются полевые транзисторы с изолированным затвором.

Помимо МДП ИС на МДП – структурах изготавливаются приборы с зарядовой связью (ПЗС). Функционирование ПЗС основано на генерации светом, хранении и направленной передаче зарядовых пакетов в приповерхностном слое полупроводника при приложении к электродам ПЗС внешних электрических напряжений.

Целью настоящей работы является изучение равновесных и неравновесных процессов в МДП – структурах на кремнии.

2 ИДЕАЛЬНЫЙ МДП - КОНДЕНСАТОР

На рис. 2.1, а показана упрощенная структура МДП – конденсатора. Верхняя обкладка – металл или поликристаллический кремний, нижняя – полупроводник *n* или *p* типа, в качестве диэлектрика обычно используется двуокись кремния. Наличие слоя *n+* уменьшает последовательное сопротивление нижней обкладки, а также зависимость емкости конденсатора от внешнего напряжения.

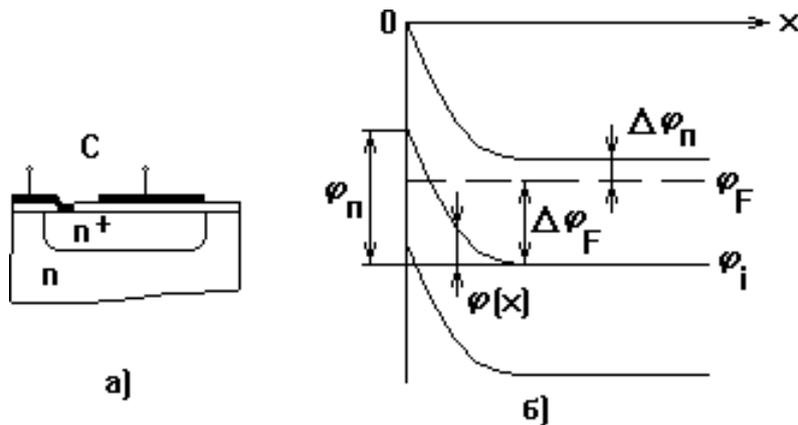


Рисунок 2.1 – Структура МДП – конденсатора (а) и зонная диаграмма (б) приповерхностного слоя полупроводника

В идеальном конденсаторе не учитывают поверхностные состояния на границе диэлектрик – полупроводник, разность работ выхода в МДП – структуре, заряд в диэлектрике.

Емкость МДП – конденсатора

$$C = \frac{C_d C_{\Pi}}{C_d + C_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

где C_d – емкость диэлектрика; C_{Π} – дифференциальная емкость полупроводника.

Удельная емкость диэлектрика

$$C_{d0} = \frac{\epsilon_d \epsilon_0}{d}, \quad (2.2)$$

где d и ϵ_d – толщина слоя и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная. Дифференциальная емкость C_{Π} зависит от величины заряда в приповерхностном слое полупроводника и протяженности (ширины) этого слоя.

На рис. 2.1, б показана зонная диаграмма границы диэлектрик – полупроводник: ϕ_n – поверхностный потенциал; ϕ_F – потенциал Ферми; ϕ_i – потенциал середины запрещенной зоны; $\Delta\phi_F = (\phi_i - \phi_F)$ – потенциал вне приповерхностного слоя. Будем полагать, что для

полупроводника *n* типа $\Delta\varphi_F < 0$ и $\varphi_{\Pi} < 0$. Если $|\varphi_{\Pi}|$ увеличивается, то концентрация электронов в поверхностном слое уменьшается и образуется область пространственного заряда ионизованных доноров толщиной

$$W = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\Pi}\varepsilon_0|\varphi_{\Pi}|}{qN_D}}. \quad (2.3)$$

Здесь ε_{Π} – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, q – заряд электрона, N_D – концентрация доноров.

При $|\varphi_{\Pi}| > |\Delta\varphi_F|$ в тонком поверхностном слое происходит инверсия типа проводимости полупроводника (обогащение поверхностного слоя дырками), а при $|\varphi_{\Pi}| \geq 2|\Delta\varphi_F|$ – сильная инверсия. При $\varphi_{\Pi} > 0$ поверхностный слой полупроводника обогащается электронами – основными носителями заряда.

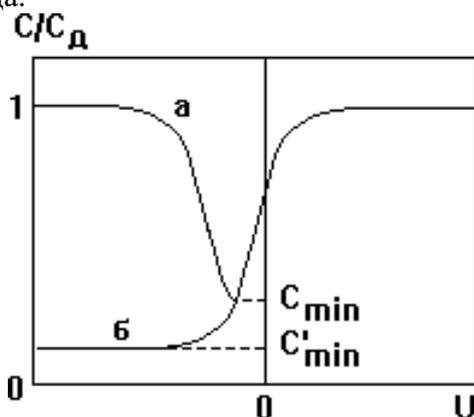


Рисунок 2.2 – Низкочастотная (а) и высокочастотная (б) зависимости относительной емкости МДП – конденсатора от приложенного напряжения

На рис. 2.2 представлена зависимость емкости идеального МДП – конденсатора от напряжения смещения U . Для плоских зон ($\varphi_{\Pi} = 0$) удельная емкость полупроводника

$$C_{\text{По}} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_{\Pi}\varepsilon_0}}{L_D}, \quad (2.4)$$

$$L_D \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\Pi}\varepsilon_0\varphi_T}{qN_D}}. \quad (2.5)$$

где L_D – длина Дебая,

$\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал,

k – постоянная Больцмана,

T – температура.

В диапазоне $0 < |\varphi_{\Pi}| < 2|\Delta\varphi_F|$

$$C_{\text{По}} = \frac{\varepsilon_{\Pi}\varepsilon_0}{W}, \quad (2.6)$$

При $\varphi_{\Pi} = 2\Delta\varphi_F$ наступает сильная инверсия и ширина слоя пространственного заряда достигает максимального значения

$$W_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\Pi}\varepsilon_0|2\Delta\varphi_F|}{qN_D}}. \quad (2.7)$$

Соответствующее W_{max} напряжение (квазипороговое)

$$U'_{\text{пор}} \approx -\frac{Q_{\text{П}}}{C_{\text{До}}} + 2\Delta\varphi_{\text{F}}, \quad (2.8)$$

где $Q_{\text{П}} = Q_{\text{Р}} + qN_{\text{Д}}W_{\text{max}}$ – плотность суммарного положительного заряда в приповерхностном слое; $Q_{\text{Р}} \ll qN_{\text{Д}}W_{\text{max}}$ – соответствующая плотность пространственного заряда дырок.

Дальнейшее увеличение $|\varphi_{\text{П}}|$ ($U < 0$) вызывает появление пространственного заряда дырок, экранирующего внутренний слой пространственного заряда ионизированных доноров, что вызывает возрастание емкости $C_{\text{П}}$. При рабочих частотах $f > 100$ Гц пространственный заряд дырок не успевает отслеживать изменение напряжения, и емкость СП не возрастает (рис. 2.2, кривая б, $U < 0$). Как следует из выражения для емкости МДП – конденсатора,

$$C'_{\text{min0}} = \frac{\varepsilon_{\text{Д}}\varepsilon_0}{d + \frac{\varepsilon_{\text{Д}}}{\varepsilon_{\text{П}}}W_{\text{max}}}. \quad (2.9)$$

Величина $\Delta\varphi_{\text{П}}$ (см. рис. 2.1, б)

$$\Delta\varphi_{\text{П}} = \frac{E_{\text{g}}}{2} - \varphi_{\text{T}} \ln\left(\frac{N_{\text{Д}}}{n_{\text{i}}}\right), \quad (2.10)$$

где E_{g} – ширина запрещенной зоны,

n_{i} – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике.

При $U > 0$ с ростом $\varphi_{\text{П}}$ емкость полупроводника быстро увеличивается до значений СП \gg СД и емкость МДП – конденсатора C становится равна емкости диэлектрика СД.

Максимальную ширину слоя пространственного заряда можно определить по формуле

$$W_{\text{max}} = \left(\frac{C_{\text{Д}}}{C'_{\text{min}}} - 1\right) \frac{\varepsilon_{\text{П}}d}{\varepsilon_{\text{Д}}}. \quad (2.11)$$

Концентрация доноров $N_{\text{Д}}$ находится методом последовательных приближений из уравнения

$$\frac{\ln\left(\frac{N_{\text{Д}}}{n_{\text{i}}}\right)}{N_{\text{Д}}} = \frac{W_{\text{max}}^2 q}{4\varepsilon_0\varepsilon_{\text{П}}\varphi_{\text{T}}}. \quad (2.12)$$

3 РЕАЛЬНЫЙ МДП - КОНДЕНСАТОР

В реальных конденсаторах необходимо учитывать и поверхностные состояния на границе диэлектрик – полупроводник, и разность работы выхода МДП – структуры, и заряд в диэлектрике.

Учет поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO₂ эквивалентен введению в выражение для $U'_{\text{пор}}$ заряда поверхностных состояний – QПС.

Разность работ выхода МДП – структуры

$$\varphi_{\text{МП}} = \varphi_{\text{М}} - \varphi_{\text{ПД}} - \Delta\varphi_{\text{F}} - \frac{E_{\text{g}}}{2}, \quad (3.1)$$

где $\varphi_{\text{М}}$ и $\varphi_{\text{ПД}}$ – работа выхода металла и высота потенциального барьера на границе полупроводник – диэлектрик (для Si – SiO₂ $\varphi_{\text{ПД}} = 4,35$ В при температуре $T = 300$ К).

Рассмотренные два фактора, а также пространственный заряд, обычно присутствующий в диэлектрике ($Q_{\text{Д}}$), влияют на величину порогового напряжения. С их учетом

$$U'_{\text{пор}} \approx -\frac{Q_{\text{П}} + Q_{\text{ПС}} + Q_{\text{Д}}}{C_{\text{До}}} + 2\Delta\varphi_{\text{F}} + \varphi_{\text{МП}}, \quad (3.2)$$

Как правило, $Q_{\text{Д}} > 0$ и его значение определяется качеством технологического процесса изготовления ИС. Оно может меняться в довольно широких пределах, ухудшая стабильность

$U_{пор}$. Для обеспечения постоянства $U_{пор}$ необходимо, чтобы выполнялось условие $Q_d \ll (Q_p + Q_{пс})$.

В таблице показаны знаки величин, входящих в выражение для $U_{пор}$. В соответствии с этим выражением наличие $\varphi_{мп}$, $Q_{пс}$ и Q_d вызывает сдвиг вольт- фарадной характеристики (ВФХ) реального МДП – конденсатора (относительно ВФХ идеального) по оси напряжений на так называемое напряжение плоских зон

Таблица 3.1 – Знаки величин, входящих в соотношение для $U_{пор}$

Тип полупроводника	Знаки величин				
	$Q_{пс}$	Q_p	$\Delta\varphi_F$	$\varphi_{мп}$	Q_d
n	+	+	-	-	+
p	+	-	+	-	+

4 РЕЛАКСАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЕМКОСТИ

Если на МДП – конденсатор подать прямоугольный импульс напряжения с амплитудой $U > U_{пор}$, то в начальный момент весь положительный заряд в полупроводнике будет обусловлен ионизированными донорами. Этот заряд доноров не будет экранироваться дырками и, следовательно, ширина области объемного заряда h окажется больше равновесного значения W_{max} .

Формирование объемного заряда доноров происходит очень быстро – за счет отталкивания электронов от поверхности в объем полупроводника. Время формирования заряда доноров определяется произведением диэлектрической проницаемости на удельное объемное сопротивление полупроводника и составляет $10^{-11} \div 10^{-12}$ с.

В отсутствие освещения накопление дырок (заполнение потенциальной ямы) происходит значительно медленнее – от десятков миллисекунд до единиц секунд. Выделяют три основных механизма накопления заряда:

диффузия из объема полупроводника (тепловой ток);

генерация в области объемного заряда;

генерация на поверхности полупроводника под электродом.

По мере увеличения заряда дырок ширина области объемного заряда W (глубина потенциальной ямы) уменьшается и емкость МДП – конденсатора увеличивается.

Генерационный ток i зависит от ширины области неравновесного обеднения W :

$$i = A_g q n_i \left[\left(\frac{1}{\tau_g} + \frac{4S_0}{A_g/d} \right) W + S \right], \quad (4.1)$$

где A_g – площадь МДП – структуры, τ_g – время жизни неосновных носителей, S_0 – скорость поверхностной генерации при отсутствии на поверхности инверсионного слоя, S – скорость поверхностной генерации с инверсионным слоем.

Величина W определяется по формуле

$$W = A_g \epsilon_n \epsilon_0 \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_d} \right) \quad (4.2)$$

Наклон кривой

$$i = f(1/C) \quad (4.3)$$

характеризует генерационное время жизни неосновных носителей. Скорость генерации при $W = 0$ определяет скорость поверхностной генерации S .

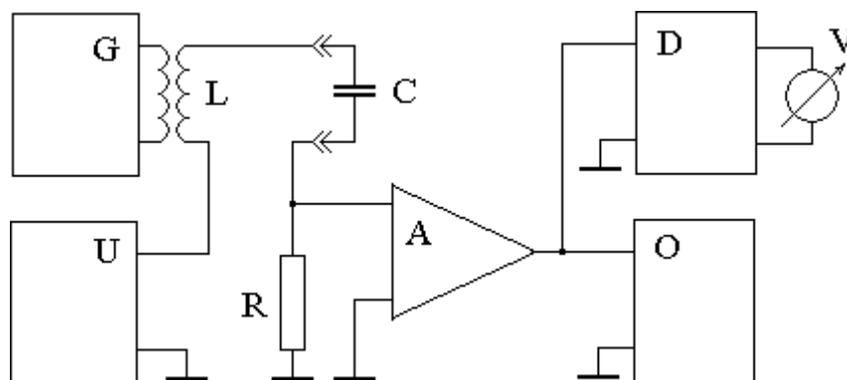
Заряд в потенциальных ямах ПЗС, накапливаемый в отсутствие освещения за счет процессов генерации и диффузии неосновных носителей из объема полупроводника,

является паразитным. Для того, чтобы передавать информацию с минимальными искажениями, необходимо чтобы информационный заряд всегда был много больше паразитного.

Время, за которое паразитный заряд достигает $1 \div 2 \%$ от информационного, называют временем хранения информации. Определить время хранения информации можно из зависимости паразитного заряд от длительности импульса напряжения на затворе или из кривых релаксации емкости МДП – конденсатора в режиме неравновесного обеднения.

5 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являются МДП структуры Si – SiO₂ – Al с круглыми электродами диаметром 1 мм. Емкость структур измеряется с помощью RC делителя (см. рис. 5.1). Измерительный сигнал $VГ$ (частота $f = 1,75$ МГц) накладывается на напряжение смещения U . На частоте измерительного сигнала сопротивление емкости C много больше, чем резистора R и индуктивности L . Падение напряжения на резисторе пропорционально измеряемой емкости: $V_R = VГ \cdot 2 \pi f C R$.



G – высокочастотный генератор, U – источник напряжения смещения,
A – селективный усилитель, D – детектор, V – вольтметр, O – осциллограф
Рисунок 5.1 – Схема измерений

ВФХ структур измеряется по точкам (режим «С»). Используется встроенный источник напряжения смещения.

Для исследования релаксации неравновесной емкости (режим «С(t)») к лабораторному макету подключаются осциллограф и генератор прямоугольных импульсов.

Перед измерениями проводится калибровка макета (режим «Калибровка»): к разъему «С» подключается эталонная емкость и ручкой «Калибровка» на макете (или «Усиление» на осциллографе) устанавливается заданное значение емкости.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как и почему емкость МДП – конденсатора зависит от напряжения?
2. Что такое неравновесное обеднение?
3. Что называют временем хранения информационного заряда?
4. Что такое режим сильной инверсии?
5. Что такое напряжение плоских зон и пороговое напряжение?
6. Как определить максимальный информационный заряд, накапливаемый в структуре?
7. Как определить время хранения информационного заряда по кривой релаксации неравновесной емкости?

7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1. М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Фотоприемники на МДП – структурах [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://vuzlit.ru/2125329/fotopriemniki_na_mdp-strukturah, свободный (дата обращения: 30.12.2020).
4. Емкостные методы исследования МДП – структур [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://poisk-ru.ru/s11254t3.html>, свободный (дата обращения: 30.12.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Заряд электрона, $q = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ Кл Постоянная Больцмана, $k = 1,38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Диэлектрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-14}$ Ф/см

Относительная диэлектрическая проницаемость двуокиси кремния, $\epsilon_d = 3,9$

Относительная диэлектрическая проницаемость кремния, $\epsilon_{\text{п}} = 11,9$ Собственная концентрация носителей заряда в кремнии при 300 К, $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ см⁻³.