

Министерство образования Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной
аппаратуры (КУДР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой КУДР, профессор
_____ Н.С. Несмелов
_____ 2010 г.

Интегральные устройства радиоэлектроники
ЭЛЕМЕНТЫ МДП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
Руководство к лабораторной работе для студентов
специальности 210201

Рецензент	Разработчики
Зав. кафедрой КУДР, профессор _____ Н.С. Несмелов _____ 2010 г.	Доцент кафедры КУДР _____ М.Н. Романовский _____ 2010 г.
	Доцент кафедры КУДР _____ М.М. Славникова _____ 2010 г.

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 – конденсаторах 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.

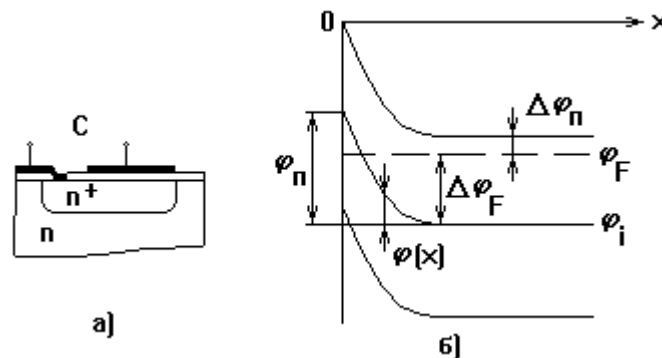


Рисунок 2.1 - Структура МДП - конденсатора (а) и зонная диаграмма (б) приповерхностного слоя полупроводника

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

Емкость МДП – конденсатора

$$C = C_d C_{\pi} / (C_d + C_{\pi}),$$

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

$$C_d = \epsilon_d \epsilon_0 / h_d,$$

где h_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_{Π} – 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 $\Delta\phi_F < 0$ и $\phi_{\Pi} < 0$. Если $|\phi_{\Pi}|$ увеличивается, то концентрация электронов в поверхностном слое уменьшается и образуется область пространственного заряда ионизованных доноров толщиной

$$h_{\Pi} \approx \sqrt{2\epsilon_{\Pi}\epsilon_0|\phi_{\Pi}|/(qN_D)}.$$

Здесь ϵ_{Π} – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, q – заряд электрона, N_D – концентрация доноров в полупроводнике. При $|\phi_{\Pi}| > |\Delta\phi_F|$ в тонком поверхностном слое происходит инверсия типа проводимости полупроводника, а при $|\phi_{\Pi}| \geq 2|\Delta\phi_F|$ – сильная инверсия (сильное обогащение поверхностного слоя дырками). При $\phi_{\Pi} > 0$ поверхностный слой полупроводника обогащается электронами – основными носителями заряда.

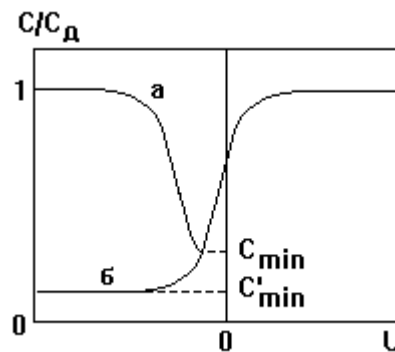


Рисунок 2.2 – Низкочастотная (а) и высокочастотная (б) зависимости относительной емкости МДП – конденсатора от приложенного напряжения

На рис. 2.2 представлена зависимость емкости МДП – конденсатора от напряжения смещения. Для плоских зон ($\phi_{\Pi} = 0$)

$$C_{\Pi} = \sqrt{2\epsilon_{\Pi}\epsilon_0} / L_D,$$

где $L_D \approx \sqrt{2\epsilon_{\Pi}\epsilon_0\phi_T/(qN_D)}$ – длина Дебая, $\phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал, k – постоянная Больцмана, T – температура. В диапазоне $0 < |\phi_{\Pi}| < 2|\Delta\phi_F|$

$$C_{\Pi} = \epsilon_{\Pi}\epsilon_0 / h_{\Pi}.$$

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

$$h_{\text{п max}} \approx \sqrt{2\varepsilon_{\text{п}}\varepsilon_0|2\Delta\varphi_{\text{F}}|/(qN_{\text{Д}})}.$$

Соответствующее $h_{\text{п max}}$ напряжение (квазипороговое)

$$U'_{\text{пор}} \approx -Q_{\text{п}}/C_{0\text{д}} + 2\Delta\varphi_{\text{F}} \approx -qN_{\text{Д}}h_{\text{п max}}/C_{0\text{д}} + 2\Delta\varphi_{\text{F}},$$

где $Q_{\text{п}} = Q_{\text{р}} + qN_{\text{Д}}h_{\text{п max}}$ – плотность суммарного положительного заряда в приповерхностном слое; $Q_{\text{р}} \ll qN_{\text{Д}}h_{\text{п max}}$ – 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 . При рабочих частотах $f > 100$ Гц пространственный заряд дырок не успевает отслеживать изменение напряжения, и емкость C не возрастает (рис. 2.2, кривая б, $U < 0$). Как следует из выражения для емкости МДП – конденсатора,

$$C'_{0\text{min}} = \varepsilon_{\text{д}}\varepsilon_0/[h_{\text{д}} + (\varepsilon_{\text{д}}/\varepsilon_{\text{п}})h_{\text{п max}}].$$

Это соотношение можно использовать для определения $N_{\text{Д}}$. Величина $\Delta\varphi_{\text{п}}$ (см. рис. 2.1, б) находится по формуле

$$\Delta\varphi_{\text{п}} = \varphi_{\text{а}}/2 - \varphi_{\text{T}} \ln(N_{\text{Д}}/n_{\text{i}}),$$

где $\varphi_{\text{а}}$ – ширина запрещенной зоны. Потенциал вне приповерхностного слоя

$$\Delta\varphi_{\text{F}} = \Delta\varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{а}}/2 = -\varphi_{\text{T}} \ln(N_{\text{Д}}/n_{\text{i}}).$$

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

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 $U'_{\text{пор}}$ некоторого заряда $Q_{\text{пс}}$ поверхностных состояний.

Разность работ выхода МДП – структуры

$$\varphi_{\text{МП}} = \varphi_{\text{м}} - \varphi_{\text{пд}} - \Delta\varphi_{\text{F}} - \varphi_{\text{а}}/2,$$

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_d), влияют на величину порогового напряжения. С их учетом

$$U_{\text{пор}} = -(Q_{\text{п}} + Q_{\text{пс}} + Q_d) / C_{0d} + 2\Delta\phi_F + \phi_{\text{МП}}.$$

Как правило, $Q_d > 0$ и его значение определяется качеством технологического процесса изготовления ИС. Оно может меняться в довольно широких пределах, ухудшая стабильность $U_{\text{пор}}$. Для обеспечения постоянства $U_{\text{пор}}$ необходимо, чтобы $Q_d \ll (Q_{\text{п}} + Q_{\text{пс}})$.

В таблице показаны знаки величин, входящих в выражение для $U_{\text{пор}}$. В соответствии с этим выражением наличие $\phi_{\text{МП}}$, $Q_{\text{пс}}$ 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 – Знаки величин, входящих в соотношение для $U_{\text{пор}}$

Тип полу-проводника	Знаки величин				
	$Q_{\text{пс}}$	$Q_{\text{п}}$	$\Delta\phi_F$	$\phi_{\text{МП}}$	Q_d
n	+	+	-	-	+
p	+	-	+	-	+

4 РЕЛАКСАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЕМКОСТИ

Если на МДП – конденсатор подать прямоугольный импульс напряжения с амплитудой $U > U_{\text{пор}}$, 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 $h_{\text{Гmax}}$.

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 h (глубина потенциальной ямы) уменьшается и емкость МДП – конденсатора увеличивается.

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

Объект исследования - структуры Al-SiO₂-Si с круглыми электродами.

Емкость измеряется методом R-C делителя (см. рис. 5.1). Измерительный сигнал V_{Γ} (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: $V_R = V_{\Gamma} 2 \pi f C R$.

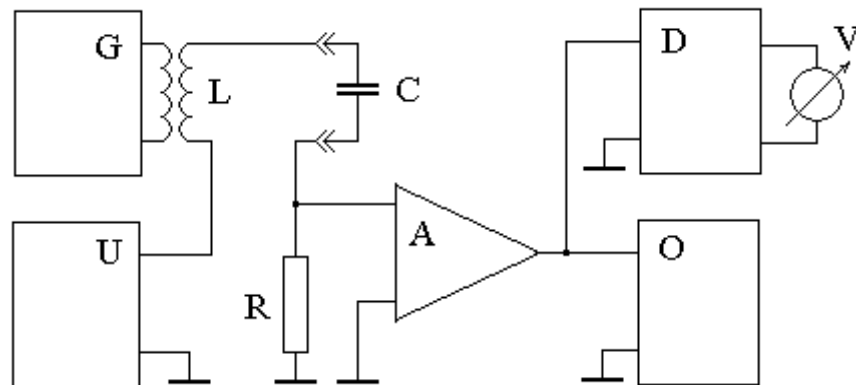


Рисунок 5.1 – Схема измерений:

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

ВФХ структуры 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.

5 ЗАДАНИЕ

- 5.1 Измерить ВФХ МДП – структуры.
- 5.2 Определить толщину диэлектрика, концентрацию примеси в полупроводнике, напряжение плоских зон, пороговое напряжение.
- 5.3 Измерить релаксационную кривую неравновесной емкости. Амплитуду импульсов выбрать на 5 В большей порогового напряжения.
- 5.4 Определить максимальный информационный заряд, накапливаемый в МДП - структуре.
- 5.5 Оценить время хранения информационного заряда. Паразитный заряд не должен превышать десяти процентов от максимального информационного заряда при данной амплитуде импульсов.
- 5.6 Объяснить полученные результаты.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1 Как и почему емкость МДП – конденсатора зависит от напряжения?
- 6.2 Что такое неравновесное обеднение?
- 6.3 Что называют временем хранения информационного заряда?
- 6.4 Что такое режим сильной инверсии?
- 6.5 Что такое напряжение плоских зон и пороговое напряжение?
- 6.6 Как определить максимальный информационный заряд, накапливаемый в структуре?
- 6.7 Как определить время хранения информационного заряда по кривой релаксации неравновесной емкости?

7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 7.1 Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. - М.: Радио и связь, 1992. - 320 с.
- 7.2 Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1. - М.: Мир, 1984. - 456 с.
- 7.3 Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. – М.: Мир, 1978. – 328 с.

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, $\epsilon_{\Pi} = 11,9$

Собственная концентрация

носителей заряда в кремнии при 300 К, $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ см⁻³