

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 3
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

**Устройства функциональной
электроники в радиоэлектронных
системах и комплексах**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 3
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Составитель А. И. Сукачев

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах: методические указания к выполнению лабораторной работы № 3 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. И. Сукачев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 14 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы принципов работы устройств на приборах с зарядовой связью. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах».

Предназначены для студентов 4 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле УФЭвРЭСиК_УМД_ЛР3.pdf.

Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с программой курса «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Цель работы – ознакомиться с принципом действия и некоторыми расчетными соотношениями для устройств на приборах с зарядовой связью (ПЗС).

1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЗС

Прибор с зарядовой связью представляет собой ряд простых МД П структур (металл-диэлектрик-полупроводник), сформированных на общей полупроводниковой подложке (континуальная среда) таким образом, что полосы металлических электродов образуют линейную или регулярную матричную среду (рис. 1.1), в которой расстояния между соседними электродами достаточно малы ($l=2\dots 4$ мкм). Это обстоятельство обуславливает тот факт, что в работе устройства определяющим является взаимодействие соседних МДП-структур.

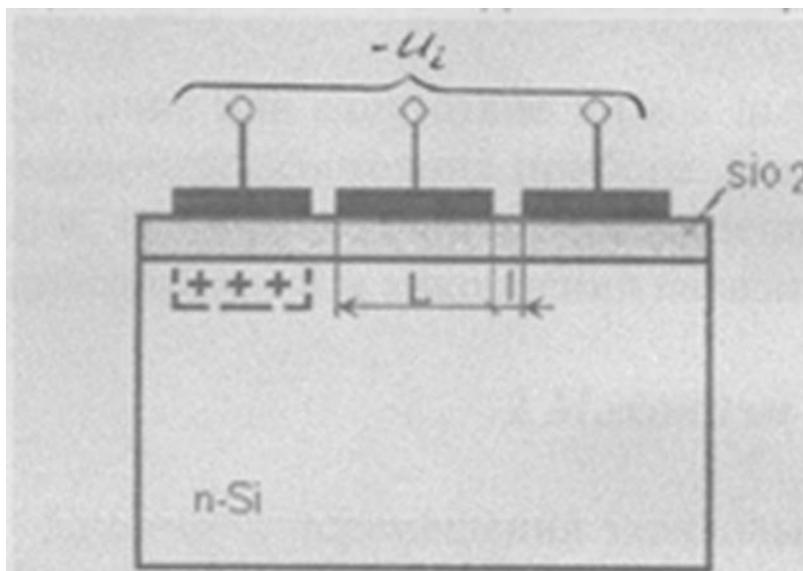


Рис. 1.1. Структура прибора с зарядовой связью

Металлические электроды ПЗС называют затворами. Если к любому затвору приложить отрицательное напряжение (для подложки *n*-типа проводимости), то под действием возникающего электрического поля электроны, являющиеся основными носителями в подложке, уходят от поверхности вглубь полупроводника. У поверхности образуется обедненная

область, которая на энергетической диаграмме представляет собой потенциальную яму для неосновных носителей–дырок. Глубина этой области зависит от величины приложенного напряжения, и в соответствии с формулой

$$l_{oc} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U}{eN_{\delta}^+}}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; e - заряд электрона; N_{δ}^+ – концентрация ионизированных доноров.

Попадая в эту область, дырки под действием электрического поля затвора притягиваются к поверхности полупроводника и локализуются в узком инверсионном слое. Заряд неосновных носителей, инжектированный каким-либо образом в область потенциальной ямы, может храниться в ней без искажений в течение десятков миллисекунд. Для перемещения заряда (динамическая неоднородность) вдоль поверхности к соседнему электроду прикладывается более отрицательное напряжение, которое формирует под этим электродом более глубокую потенциальную яму. Под действием диффузии, дрейфа и возникающего в коротком зазоре продольного поля дырки перетекают в более глубокую потенциальную яму соседнего затвора (рис. 1.2).

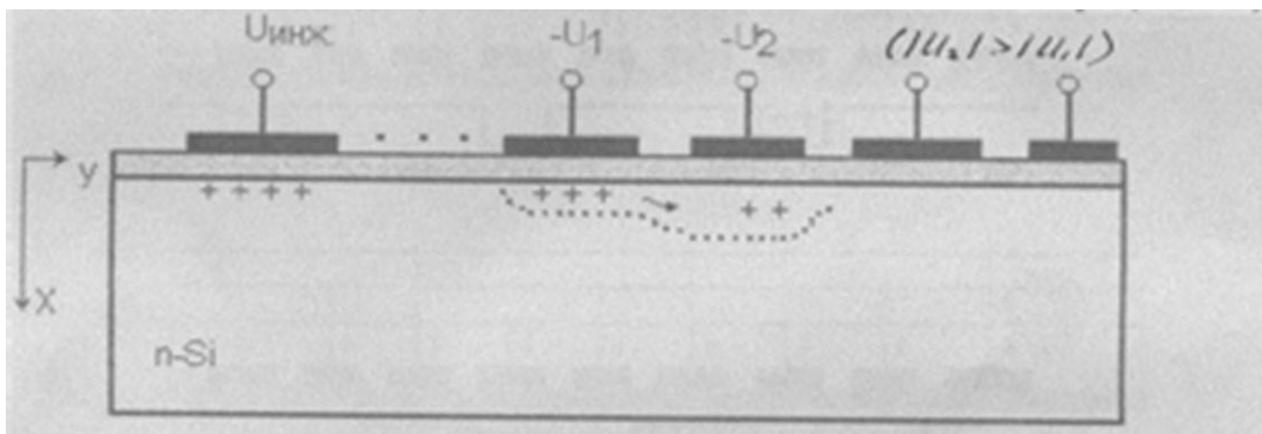


Рис. 1.2. Перемещение заряда в ПЗС

Наличие или отсутствие заряда дырок под электродом характеризует два информационных состояния прибора. Очевидно, что информация в потенциальной яме ПЗС не может храниться бесконечно долго вследствие эффекта тепловой генерации носителей и накопления паразитного заряда.

1.2. МЕХАНИЗМ РАБОТЫ ПЗС

Динамику перемещения зарядовых пакетов в ПЗС проследим на примере трехфазного (трехтактного) сдвигового регистра (рис. 1.3).

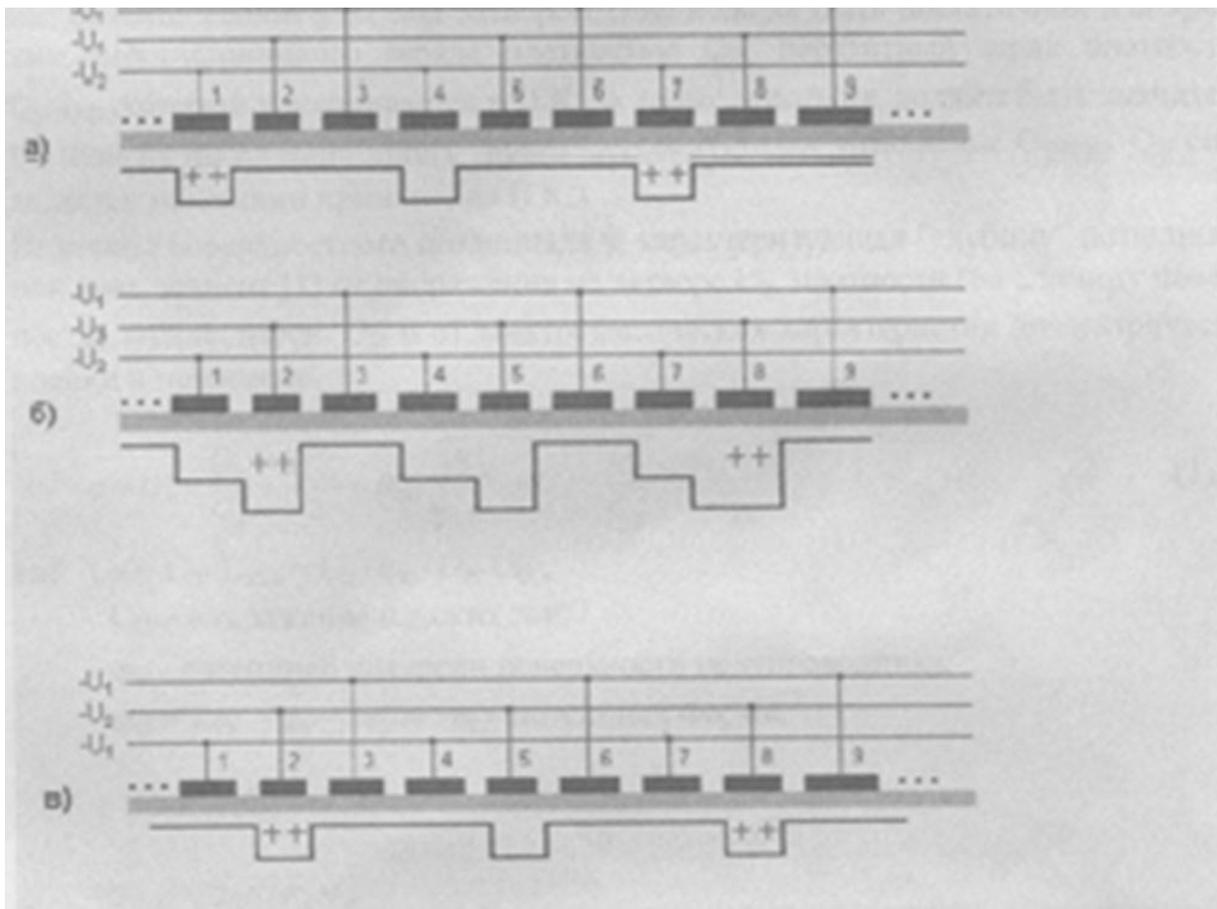


Рис. 1.3. Схема трехтактного сдвигового регистра на ПЗС

В этой схеме каждый третий электрод подключается к соответствующей шине тактовых импульсов. В исходном состоянии (рис. 1.3, а) под напряжением хранения $U_{\text{хр}} = -U_2$ находятся затворы 1,4,7, а все остальные – под напряжением $-U_1$ ($U_1 < U_2$), подложка заземлена. Напряжение U_1 выбирается немного больше порогового напряжения U_0 (величина U_0 для МДП-структуры определяется, как минимальное напряжение на затворе, при котором наступает инверсия поверхности полупроводника) для того, чтобы вся поверхность полупроводника была обеднена и на поверхностных состояниях отсутствовали электроны. Допустим, что в потенциальных ямах под затворами 1,7 есть зарядовые пакеты, а под затвором 4 их нет. На следующем такте к затворам 2,5,8 прикладывается напряжение записи $U_{\text{зап.}} = -U_3$ ($U_3 > U_2$) и заряды перетекают под эти затворы (рис. 1.3, б). На следующем такте на затворах устанавливается напряжение в соответствии с рисунком 3.3 в и начинается фаза хранения зарядовой информации в элементах 2,5,8.

Таким образом, для ПЗС характерны два режима работы: хранение и передача информации, представляемой зарядом подвижных носителей. Остановимся более подробно на каждом из них.

1.3. РЕЖИМ ХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

В режиме хранения элементы ПЗС не взаимодействуют друг с другом и поэтому каждый элемент эквивалентен МДП-емкости. Заряд дырок, который хранится в потенциальной яме и характеризует информационное состояние прибора, локализуется в узком инверсном слое у поверхности полупроводника. Глубже инверсного слоя лежит обедненная область. С течением времени, как уже говорилось, величина информационного заряда изменяется вследствие притока в потенциальную яму паразитного заряда дырок, обусловленного процессами термогенерации и диффузии из объема. В стационарном состоянии при $t \rightarrow \infty$ за счет этих процессов потенциальная яма заполняется до насыщения независимо от величин начального информационного заряда. Поэтому ПЗС являются динамическими устройствами, для которых рабочий интервал тактовых частот ограничен как сверху, так и снизу.

В режиме хранения необходимо выполнение двух основных условий [1]:

«глубина» потенциальной ямы под затвором ПЗС должна быть достаточной для хранения информационного заряда плотностью Q_p ; паразитный заряд плотностью $Q_{\text{рпар.}}$, который накапливается в ПЗС за время хранения, должен быть значительно меньше информационного заряда Q_p (допустимое отношение $Q_{\text{рпар.}}/Q_p$ определяется условиями применения ПЗС).

Величина поверхностного потенциала ϕ , характеризующая «глубину» потенциальной ямы, зависит [1] от напряжения на затворе U_3 , плотности (на единицу поверхности) заряда дырок Q_p и от электрофизических характеристик диэлектрической пленки и подложки:

$$\phi = U'_3 - \frac{Q_p}{C_d} + \frac{V_{\text{ос}}^2}{2} - V_{\text{ос}} \sqrt{\frac{V_{\text{ос}}^2}{4} + U'_3 - \frac{Q_p}{C_d}}, \quad (2)$$

где $U'_3 = U_3 - U_{\text{пз}} = U'_3 + \phi_0 + U_B - U_0$; $U_{\text{пз}}$ - напряжение плоских зон; ϕ_0 - потенциал инверсии поверхности полупроводника; $\phi_0 \approx 2\phi_F$; $\phi_F = \ln(N_i/n_i)$ - потенциал Ферми; Q_p - удельный заряд поверхностных состояний; $U_B = V_{\text{ос}} \sqrt{\phi_0}$;

$V_{\text{ос}} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{\text{п}}\epsilon_0 N_d}}{C_d}$ - коэффициент, учитывающий влияние обедненного слоя

подложки; $C_d = \epsilon_d \epsilon_0 / X_d$ - удельная емкость диэлектрика затвора толщиной X_d ; $\epsilon_{\text{п}}$, ϵ_d - диэлектрическая проницаемость соответственно подложки и диэлектрика; N_i - концентрация примеси в подложке, далее N_d для n-типа подложки; n_i - концентрация носителей в собственном полупроводнике; q - заряд электрона; U_0 - минимальное напряжение на затворе МДП структуры, при котором наступает инверсия; $U_0 = \phi_{\text{мдп}} + Q_{\text{пов}}/C_d + \phi_0 + U_B$; $\phi_{\text{мдп}}$ - контактная разность потенциалов в МДП-структуре (прил. 1, табл. А1.); $Q_{\text{пов}}$ - удельный заряд поверхностных состояний.

Максимальный заряд $Q_{рм}$, который может быть помещен в потенциальную яму при заданном напряжении $U_з$, определяется из (2) при условии насыщения потенциальной ямы, то есть при $\Phi = \Phi_0$:

$$Q_{рм} = C_d(U_з - U_0). \quad (3)$$

Обычно $Q_{рм} = (1 \dots 5) 10^{-3}$ пК/мкм².

Допустимое время хранения заряда определяется процессами, приводящими к накоплению паразитного заряда $Q_{рпар}$. Это процессы определяют максимальное время хранения $t_{хр.макс}$ (десятки миллисекунд) и минимальную частоту работы $f_{мин}$ цифровых и аналоговых устройств на ПЗС, а также темновые токи в фотоприемных ПЗС.

$$J_{мин} = \frac{1}{mt_{хр.макс}}$$

где m – количество тактов (фаз) в системе управления.

Для современных трехтактных схем на ПЗС типичные значения $f_{мин} = 0.1 \dots 1$ кГц.

1.4. РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ ЗАРЯДА

В режиме передачи управляющие напряжения должны обеспечить возникновение тянущего поля в зазоре между элементами ПЗС.

Определим соотношение между $U_{зап}$ и $U_{хр}$, при котором обеспечивается полная передача зарядового пакета (при $t_{пер} \rightarrow \infty$). Для упрощения положим, что область полупроводника между электродами полностью обеднена и что распределение потенциала в этой области описывается одномерным уравнением Пуассона

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{qN_d}{\epsilon_{п}\epsilon_0}, \quad (4)$$

с граничными условиями $\phi(0) = \phi_{хр}$; $\phi(1) = \phi_{зап}$. Решение этого уравнения записывается в виде:

$$\phi(y) = ay^2/2 + x(\phi_{зап} - \phi_{хр} - al^2/2)/l + \phi_{хр}, \quad (5)$$

где $a = qN_d / \epsilon_{п}\epsilon_0$.

Для того, чтобы дырки могли переходить из элемента ПЗС1 в ПЗС2, электрическое поле в зазоре в течение всего переходного процесса должно быть направлено от ПЗС1 к ПЗС2, то есть в области зазора потенциал должен монотонно возрастать ($d\phi / dy > 0$). Очевидно, что наименьшее поле будет у границы ПЗС1) ($y=0$) в конце процесса передачи, когда весь зарядовый пакет перейдет в ПЗС2. Учитывая это, можно получить условие монотонного нарастания потенциала [1]:

$$\phi_{зап}(Q_p) - \phi_{хр}(Q_p = 0) - al^2/2 > 0 \quad (6)$$

Выражая поверхностные потенциалы $\Phi_{\text{зап}}$ и $\Phi_{\text{хр}}$ через напряжения $U_{\text{зап}}$, $U_{\text{хр}}$ в соответствии с (2) и подставляя их в (6), получаем требуемое соотношение между $U_{\text{зап}}$ и $U_{\text{хр}}$.

$$U_{\text{зап}} \geq v1 + B_{\text{ос}}^2 / 2 + B_{\text{ос}} \sqrt{v1 + B_{\text{ос}}^2 / 2 - U_{\text{пз}} - Q_p / C_d} \quad (7)$$

$$v1 = U_{\text{хр}} + Q_p / C_d - B_{\text{ос}} \sqrt{B_{\text{ос}}^2 / 4 + U'_{\text{хр}}} + \frac{a l^2}{2},$$

где $U'_{\text{хр}} = U_{\text{хр}} - U_{\text{пз}} = U_{\text{хр}} - U_0 + \varphi_0 + U_B$.

Выражение (7) обладает приемлемой точностью (10...20%) для зазоров длиной $1 < 3$ мкм, при плотности поверхностных состояний $N_{\text{пов.}} < (2...3)10^{11} \text{ см}^{-2}$ [1].

Идеальная форма управляющих напряжений для трехтактной схемы (рис. 1.3) ПЗС-ступенчатая, приведена на рис. 1.4, а. Однако их формирование требует сложных генераторов. Поэтому практически для управления используют импульсы трапецеидальной формы (рис. 1.4, б), при этом передача зарядового пакета происходит на спаде импульса, длительность которого должна составлять $(2...3) t_{\text{пер}}$. Амплитуда импульсов в практических схемах составляет 10...20В.

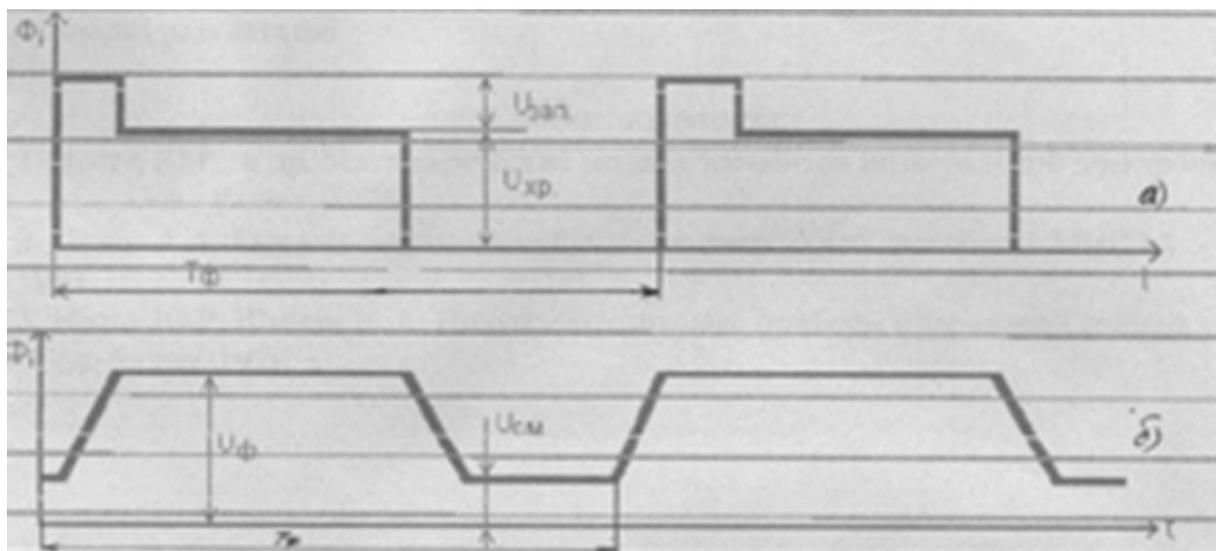


Рис. 1.4. Форма управляющих импульсов для трехтактной системы на ПЗС

Выражение (7) для трапецеидальных импульсов определяет соотношение между напряжением фазы (такта) $U_{\text{ф}}$ ($U_{\text{зап}}$ или U_3 на рис. 1.3) и напряжением смещения $U_{\text{см}}$ ($U_1 < U_{\text{хр}}$ на рис 1.3).

Максимальная частота работы ПЗС $f_{\text{макс}}$ определяется длительностью процесса передачи $t_{\text{пер}}$ зарядового пакета из одного элемента в другой:

$$F_{\text{макс}} = \frac{1}{m t_{\text{пер}}},$$

что составляет 2...10 МГц.

1.5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

Изучить принцип работы и основные закономерности передачи зарядового пакета в ПЗС-структурах.

Проанализировать выражения (2), (7); представить их в виде, удобном для расчета зависимостей: $U_{\phi} = f(U_{cm})$ при $1 = \text{const}$, и нескольких значениях N_d ; $U_{\phi} = f(N_d)$ при $U_{cm} = \text{const}$ и нескольких значениях 1 ; $U_{\phi} = f(1)$ при

$U_{cm} = \text{const}$ и нескольких значениях N_d ; по полученным данным построить графики.

Провести анализ полученных зависимостей; объяснить причины уменьшения (увеличения) напряжения передачи зарядового пакета при изменении U_{cm} , 1 , N_d . Справочные данные для расчета приведены в Приложении 1, варианты исходных данных – в приложении 2.

Следует иметь в виду, что во всех приведенных выражениях величины зарядов, напряжений и потенциалов даны в виде их абсолютных значений, то есть формулы применимы для р- и n-канальных приборов.

1.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- а) расчетные зависимости;
- б) графики полученных зависимостей;
- в) анализ результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение принципов работы устройств на приборах с зарядовой связью. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов Ю. Р. Математические модели элементов интегральной электроники. / Ю. Р. Носов - М.: Сов.радио, 1976.
2. Щука А. А. Основы интегральной электроники: учебное пособие / А. А. Щука - МИ-РЭА - М., 1993
3. Носов Ю. Р. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин - М.: Сов.радио, 1976.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЗС-СТРУКТУР

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-18} \text{ Ф/мкм};$$

$$\epsilon_{\text{д}} = 3,9;$$

$$\epsilon_{\text{п}} = \epsilon_{\text{si}} = 12;$$

$$X_{\text{д}} = 0,1 \dots 0,2 \text{ мкм};$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К};$$

$$l = 2 \dots 10 \text{ мкм};$$

$$N_i = N_{\text{д}} = 10^2 \dots 10^3 \text{ мкм}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}} = 10^{-10} \dots 5 \cdot 10^{-8} \text{ К/см}^2; n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3};$$

$$U_{\text{см}} = 1 \dots 10 \text{ В.}$$

Таблица П.1

Зависимость контактной разности потенциалов в МДП-структуре от степени легирования полупроводника (металл-алюминий)

Концентрация атомов примеси в Si, см ⁻³	φ _{мдп} , В	
	<i>Al – SiO₂-n-Si</i>	<i>Al-SiO₂-p-Si</i>
10 ¹⁴	-0,36	-0,82
10 ¹⁵	-0,30	-0,88
10 ¹⁶	-0,24	-0,94
10 ¹⁷	-0,18	-1,00

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ВАРИАНТЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

Вариант	$l=const, \text{ мкм}$	$U_{xp}=const, \text{ В}$
1	2,0	2
2		4
3		6
4		8
5		10
6	2,5	2
7		4
8		6
9		8
10		10
11	3,0	2
12		4
13		6
14		8
15		10
16	3,5	2
17		4
18		6
19		8
20		10
21	4,0	2
22		4
23		6
24		8
25		10

Пределы изменения величин:

$U_{xp} = (2 \dots 10) \text{ В};$

$l = (2 \dots 5) \text{ мкм};$

$N_i = (10^2 \dots 10^3) \text{ мкм}^{-3}.$

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Лабораторная работа №3. Анализ конструкции устройств на приборах с зарядовой связью	3
1.1. Принцип действия ПЗС	3
1.2. Механизм работы ПЗС	4
1.3. Режим хранения заряда.....	6
1.4. Режим передачи заряда.....	7
1.5. Лабораторное задание	9
1.6. Содержание отчета.....	9
Заключение.....	9
Библиографический список.....	10
Приложение 1. Справочные данные для расчета ПЗС-структур.....	11
Приложение 2. Варианты исходных данных для расчета	12

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 3
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель
Сукачев Александр Игоревич

В авторской редакции

Подписано к изданию 19.09.2022.
Уч.-изд. л. 0,6.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84