



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Учебное пособие

Методические указания
по выполнению расчетно-пояснительной записки к курсовой работе
по единому комплексному заданию по блоку дисциплины

«Технологические процессы микроэлектроники»

МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Методические указания
по выполнению расчетно-пояснительной записки к курсовой работе
по единому комплексному заданию по блоку дисциплины

«Технологические процессы микроэлектроники»

Москва
МГТУ имени Н.Э. Баумана

2012

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.973-018
И201

Методические указания по выполнению РПЗ к курсовой работе по единому комплексному заданию по блоку дисциплины «Технологические процессы микроэлектроники» / Коллектив авторов –
М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 25 с.: ил.

В методических указаниях рассмотрены основные этапы, их последовательность и содержание по выполнению РПЗ к курсовой работе по единому комплексному заданию по блоку дисциплины «Технологические процессы микроэлектроники».

Ил. 39. Табл. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 681.3.06(075.8)

Аннотация

В данной работе произведено проектирование микросхемы дешифратора 4x16. Произведён анализ принципов работы схемы, принципиальная схема преобразована в базис основных логических элементов. Правильность работы схемы подтверждена результатами моделирования. Далее, рассчитаны параметры диффузии изготовления дешифратора, рассчитаны основные размеры полевого транзистора с учётом ограничений технологии. На основании технологических ограничений составлены проектные нормы. Кроме этого произведён расчёт знаков совмещения на шаблонах.

Abstract

In this paper, manufactured chip decoder design 4x16. The analysis of the principles of the scheme, the concept is transformed into a basis of the basic logic elements. The correctness of the scheme is verified by simulation. Furthermore, the calculated diffusion parameters making the decoder, to calculate the main dimensions of the FET with the limitations of technology. Based on technological constraints made design rules. In addition, a calculation of alignment marks on the template.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ СЕМИСЕГМЕНТНОГО ДЕШИФРАТОРА.....	8
1.1 Описание схемы дешифратора 4x16	8
1.2 Приведение электрической принципиальной схемы в базис основных логических элементов.....	10
2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	12
3 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАБОЧИХ ОБЛАСТЕЙ ТРАНЗИСТОРА.....	13
3.1 Расчёт параметров диффузии при формировании р – кармана.....	13
3.2 Расчёт параметров диффузии при формировании р ⁺ - областей (областей стока и истока р-канального транзистора).....	14
3.3 Расчёт параметров диффузии при формировании n ⁺ - областей (областей стока и истока n-канального транзистора).....	15
4 РАСЧЁТ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНЗИСТОРОВ.....	16
4.1 Расчет пробивных напряжений р-п перехода р-карман – подложка.....	16
4.2 Расчет пробивных напряжений р-п перехода n ⁺ -область – р-карман.....	16
4.3 Расчет пробивных напряжений р-п перехода р ⁺ -область – подложка.....	17
5 РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.....	18
5.1 Расчёт пороговых напряжений для паразитного канала в n-подложке.....	18
5.2 Расчёт пороговых напряжений для паразитного канала в р-кармане.....	18
5.3 Расчёт пороговых напряжений в n-канальном транзисторе.....	19
5.4 Расчёт пороговых напряжений в р-канальном транзисторе.....	19
6 ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРАНЗИСТОРА.....	20
7 РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНЫХ НОРМ.....	21
8 РАСЧЁТ ЗНАКОВ СОВМЕЩЕНИЯ.....	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	25

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

БЛЭ	—	Базовый Логический Элемент
БМК	—	Базовый Матричный Кристалл
ИМС	—	Интегральная МикроСхема
КМОП	—	Комплементарная логика на транзисторах Металл – Оксид – Полупроводник
ТТЛ	—	Транзисторно – Транзисторная Логика
ЭСЛ	—	Эмиттерно – Связанная Логика

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

В настоящее время интегральные микросхемы являются основной элементной базой электронно-вычислительной аппаратуры. Причем их сложность постоянно возрастает, а проектные нормы, по которым они разрабатываются - постоянно уменьшаются. В результате площадь кристалла кремния, на котором реализуются современные электронно-вычислительные устройства, хотя и продолжает расти, но этот рост не приводит к значительному увеличению их стоимости, которую, в первом приближении, можно считать пропорциональной площади кристалла.

Разработки цифрового устройства в виде кристалла полупроводниковой ИМС представляет собой итерационный процесс, в котором можно вычлнить этапы схемотехнического и функционального моделирования и топологического проектирования.

Топологическое проектирование полупроводниковой ИМС является одним из важнейших этапов реализации цифрового устройства в виде кристалла кремния. Причем от того, насколько грамотно он выполнен, в конечном итоге, зависят электрические характеристики и стоимость цифрового устройства.

В большинстве случаев основной задачей при проектировании топологии кристалла микросхемы является минимизация его площади при заданных топологических ограничениях, иначе называемых проектными нормами.

В настоящее время цифровые устройства создаются как на основе биполярных (транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ) и эмиттерно-связная логика (ЭСЛ)), так и полевых (*p*- и *n*-канальных) транзисторов.

В случае реализации микросхемы дешифратора 4x16 на базе КМОП-технологии, основными компонентами ячейки, являются логические вентили КМОП. Поэтому от того, насколько грамотно проведенное топологическое проектирование этих элементов зависит успех в разработке цифрового устройства в целом.

Цели работы

Разработка топологии базового матричного кристалла схемы дешифратора 4x16.

Решаемые задачи

В процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

- Анализ принципов работы схемы дешифратора и приведение его схемы в базис основных логических элементов;
- Проведение моделирования работы основной и изменённой схем дешифратора;
- Расчёт параметров диффузии при формировании областей полевого транзистора по заданным размерам профиля;
- Расчёт пробивных напряжений по заданным концентрациям легирующей примеси и размерам профиля транзистора;
- Расчёт пороговых напряжений в паразитных каналах и принятие решения о необходимости введения в топологию охранных колец;
- Расчёт пороговых напряжений в каналах рабочих транзисторов;
- Разработка проектных норм с учётом проведённых расчётов и заданных технологических ограничений;
- Разработка фигур знаков совмещения;
- Разработка схемы размещения элементов на базовом матричном кристалле.

1 ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ СЕМИСЕГМЕНТНОГО ДЕШИФРАТОРА

1.1 Описание схемы дешифратора 4 x 16

Проектируемый дешифратор представляет собой дешифратор 4 x 16 (ИУ4.92.05.00.01 ЭЗ). На вход дешифратора поступает четырёхразрядный двоичный код, а также 2 входа разрешения по входу, на выходе «1» на одном из выходов.

В таблице 1.1.1 представлена таблица истинности дешифратора. Входы \bar{G}_1 и \bar{G}_2 служат для разрешения / запрещения работы дешифратора.

Таблица 1.1.1 – Таблица истинности дешифратора

Входы						Выбранный выход (0)
\bar{G}_1	\bar{G}_2	D	C	B	A	
0	0	0	0	0	0	\bar{Y}_0
0	0	0	0	0	1	\bar{Y}_1
0	0	0	0	1	0	\bar{Y}_2
0	0	0	0	1	1	\bar{Y}_3
0	0	0	1	0	0	\bar{Y}_4
0	0	0	1	0	1	\bar{Y}_5
0	0	0	1	1	0	\bar{Y}_6
0	0	0	1	1	1	\bar{Y}_7
0	0	1	0	0	0	\bar{Y}_8
0	0	1	0	0	1	\bar{Y}_9
0	0	1	0	1	0	\bar{Y}_{10}
0	0	1	0	1	1	\bar{Y}_{11}
0	0	1	1	0	0	\bar{Y}_{12}
0	0	1	1	0	1	\bar{Y}_{13}
0	0	1	1	1	0	\bar{Y}_{14}
0	0	1	1	1	1	\bar{Y}_{15}
X	1	X	X	X	X	-
1	X	X	X	X	X	-

X: Любое состояние

Моделирование схемы дешифратора производилось в пакете Proteuse 7. На рисунке 1.1.1 представлена схема моделирования.

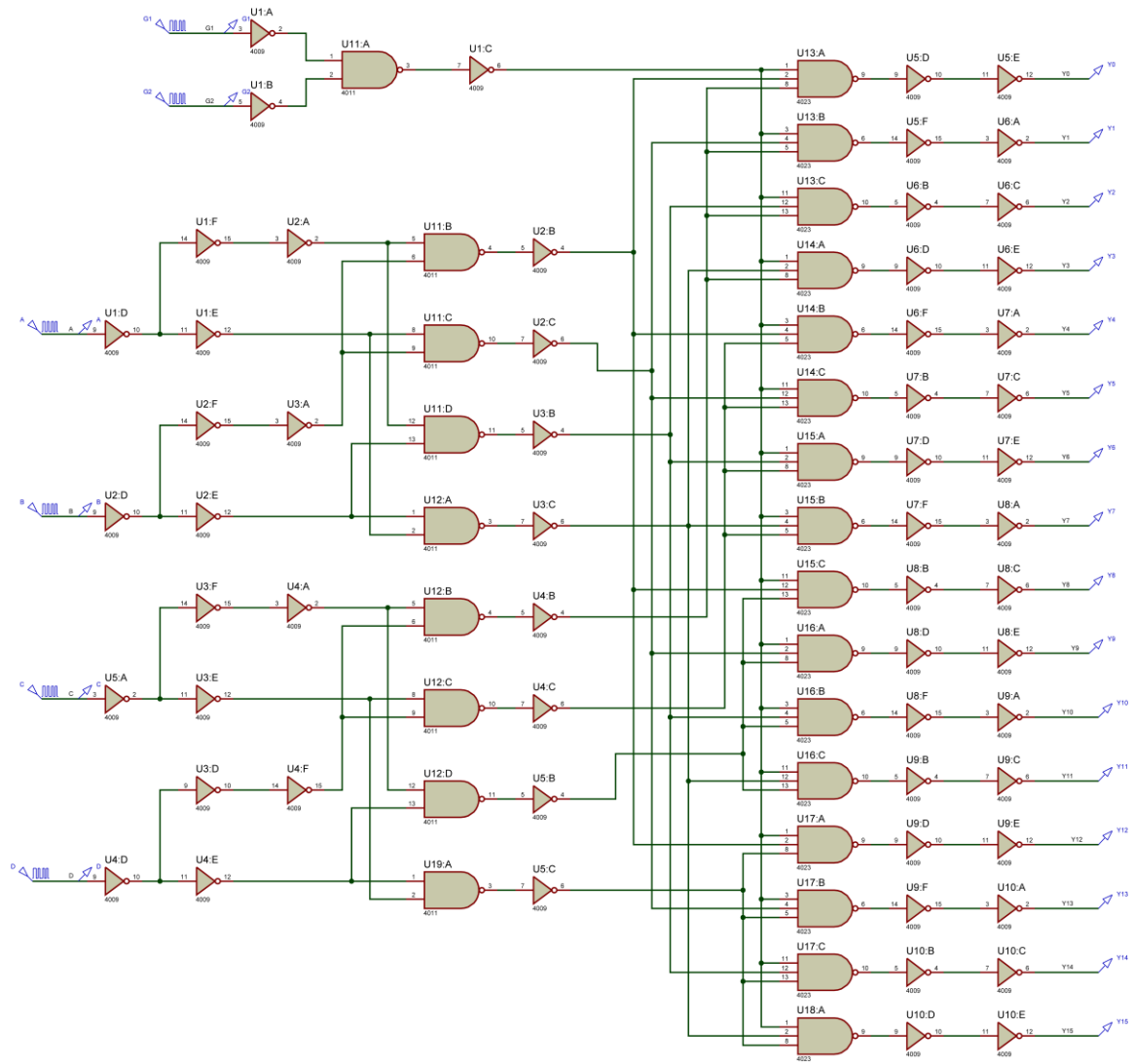


Рисунок 1.1.1 – Схема моделирования дешифратора в пакете Proteus 7

Временные диаграммы, полученные в результате моделирования представлены на рисунке 1.1.3.

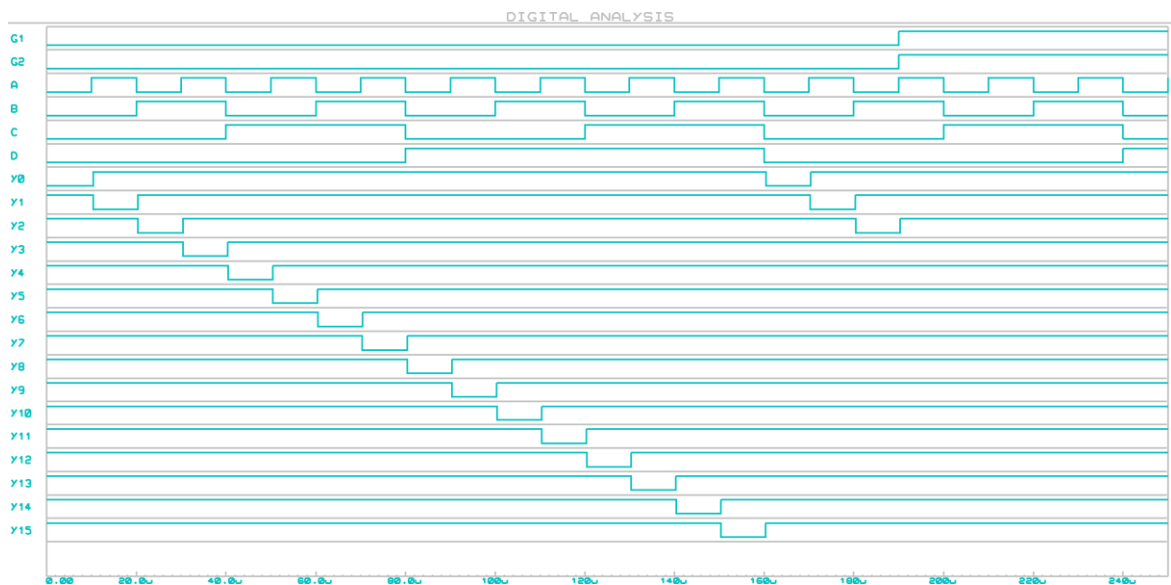


Рисунок 1.1.1 – Временные диаграммы работы схемы дешифратора

1.2 Приведение электрической принципиальной схемы в базис основных логических элементов

Так как проектируемая микросхема изготавливается по КМОП-технологии [2], то при преобразовании электрической принципиальной схемы она была приведена к базису основных логических элементов: НЕ, ЗИ-НЕ, так как для реализации именно этих логических вентилях требуется наименьшее число полевых транзисторов [3]. Все элементы схемы 2И-НЕ были заменены на ЗИ-НЕ при сохранении выполняемой логической функции. Правильность выполненного преобразования была проверена в пакете Proteuse 7 (рисунок 1.2.1).

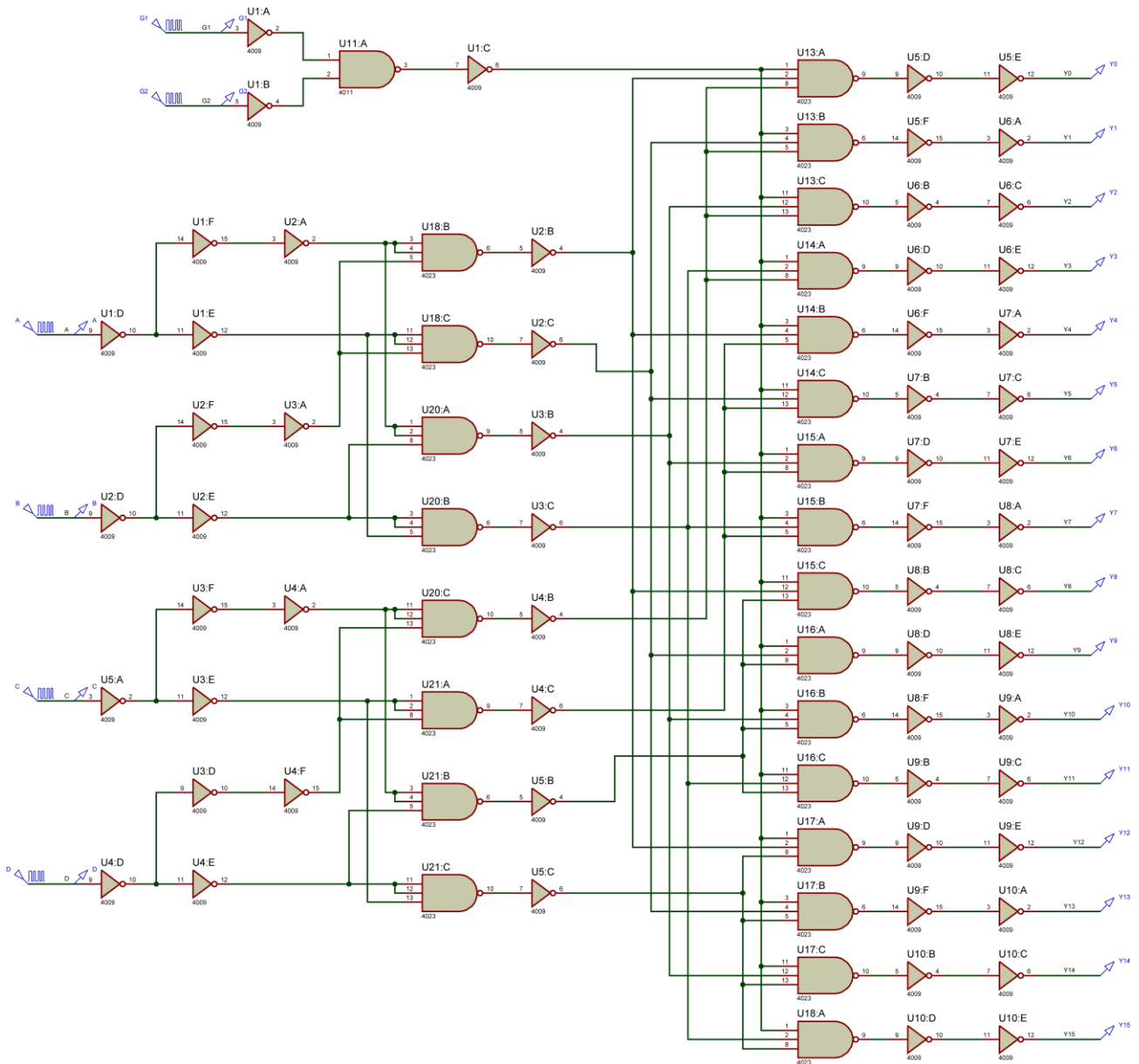


Рисунок 1.2.1 – Схема моделирования дешифратора в базисе основных логических элементов

Временные диаграммы, полученные в результате моделирования изменённой схемы представлены на рисунке 1.2.2.

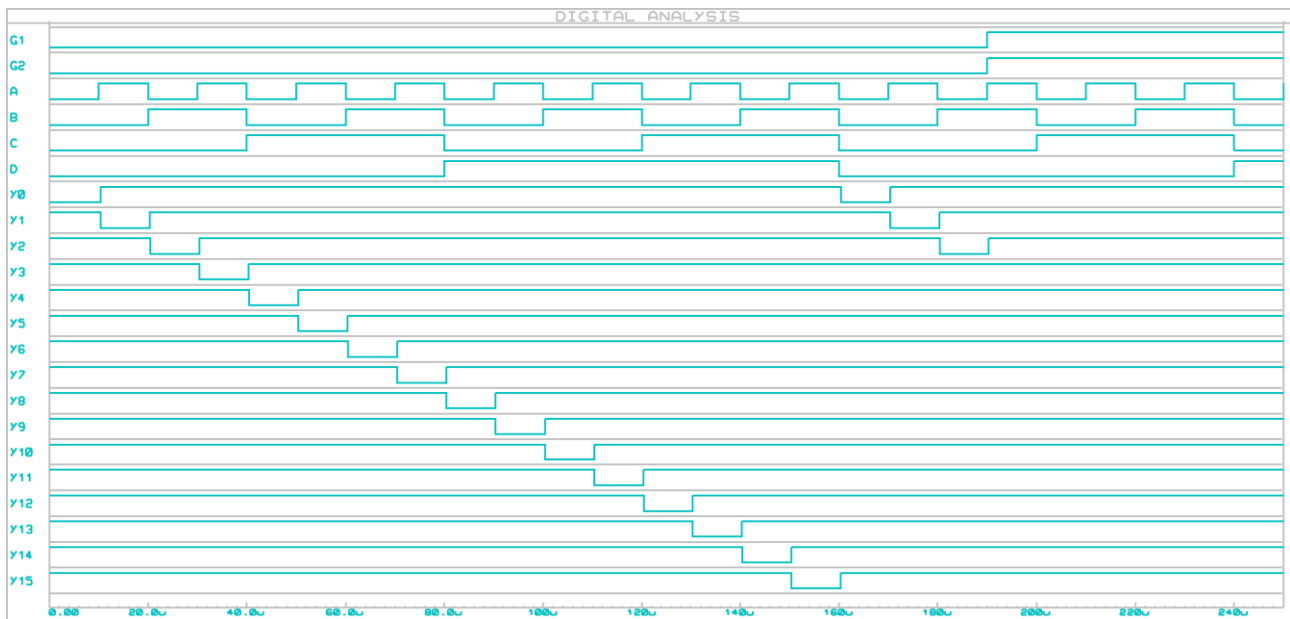


Рисунок 1.2.2 – Временные диаграммы работы изменённой схемы дешифратора

Как видно из сравнения рисунков 1.1.2 и 1.2.2, таблица истинности дешифратора сохранилась после преобразования его схемы в базис основных логических элементов. Видно, что когда \bar{G}_1 или \bar{G}_2 имеют «1», то при любом A,B,C,D выходы неопределены.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные согласно варианту домашнего задания [2] представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

№	Параметр	Значение
1	Толщина области р-кармана, мкм	2,4
2	Толщина областей стока и истока р-канального и п-канального транзистора, мкм	1,9
3	Толщина изолирующего окисла (SiO ₂), мкм	0,55
4	Толщина подзатворного диэлектрика (SiO ₂), мкм	0,085
5	Ширина поликремниевого затвора (gate), мкм	6
6	Толщина металлизации, мкм	0,8
7	Концентрация примеси в подложке, см ⁻³	2·10 ¹⁵
8	Концентрация примеси р-кармана, см ⁻³	4·10 ¹⁶
9	Концентрация примеси истока и стока р-канального транзистора, см ⁻³	3·10 ²⁰
10	Концентрация примеси истока и стока п-канального транзистора, см ⁻³	8·10 ²⁰

Примеси: р-области – бор, п-области – фосфор.

3 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАБОЧИХ ОБЛАСТЕЙ ТРАНЗИСТОРА

3.1 Расчёт параметров диффузии при формировании р – кармана

Поскольку р-карман имеет невысокую поверхностную концентрацию и значительную глубину, то для его формирования используется двухстадийный процесс термической диффузии.

Исходные данные:

Толщина области р-кармана	$x_{\Pi} = 2,4 \text{ мкм}$
Концентрация примеси р-кармана	$N_0 = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Концентрация примеси в подложке	$N_{исх} = N_{подл} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Расчёт параметров разгонки:

Произведение коэффициента диффузии на время разгонки вычисляется по формуле:

$$D_p \cdot t_p = \frac{x_n^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N_{исх}}\right)} = \frac{(2,4 \cdot 10^{-6})^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 10^{15}}\right)} = 4,81 \cdot 10^{-13} (\text{м}^2) = 4,81 \cdot 10^{-9} (\text{см}^2) \quad (3.1.1)$$

Необходимо задать значение поверхностной концентрации примеси N_{o3} из условия $N_o < N_{o3} < N_{пред}$. Поскольку в данном случае примесью является бор, то $N_{пред} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Значит $4 \cdot 10^{16} < N_{o3} < 3 \cdot 10^{20}$. Было выбрано значение $N_{o3} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Задавшись температурой разгонки $t^{\circ}_p = (1000 \dots 1200)^{\circ}\text{C} = 1100^{\circ}\text{C}$, по графику $D = f(t^{\circ}, N_{o3}, N_{исх})$ (рис. 3.1.1) [4], определим $D_p = 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$.

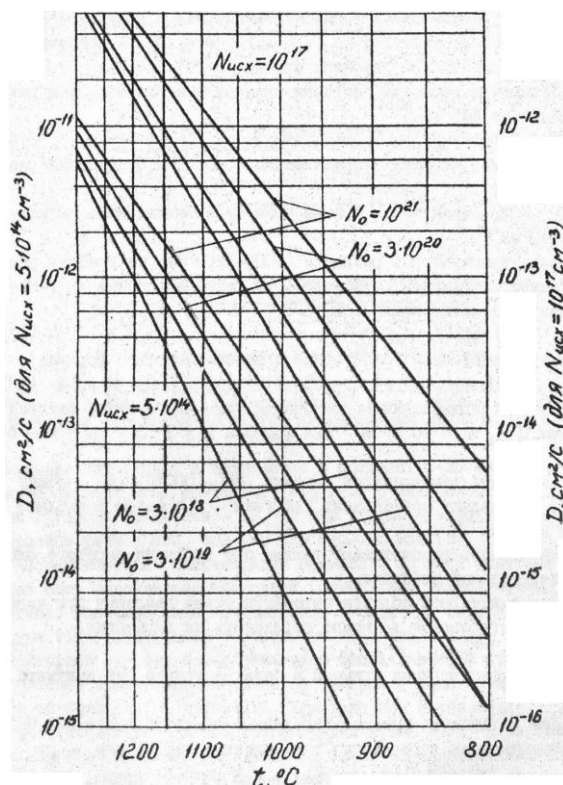


Рисунок 3.1.1 – Температурная зависимость коэффициента диффузии фосфора и бора в кремний. $N_{исх}$ и N_o – исходная и поверхностная концентрации примесей, см^{-3}

Время разгонки вычисляется по формуле:

$$t_p = \frac{D_p \cdot t_p}{D_p} = \frac{4.81 \cdot 10^{-9}}{10^{-13}} = 48100c = 801,67 \text{ мин.} \quad (3.1.2)$$

Необходимая доза легирования вычисляется по формуле:

$$Q = N_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p} = 4 \cdot 10^{16} \cdot \sqrt{\pi \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}} = 4.92 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}. \quad (3.1.3)$$

Расчёт параметров загонки:

Произведение коэффициента диффузии на время загонки вычисляется по формуле:

$$D_3 \cdot t_3 = \left(\frac{Q \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot N_{03}} \right)^2 = \left(\frac{4.92 \cdot 10^{12} \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{18}} \right)^2 = 2.11 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2. \quad (3.1.4)$$

Задавшись температурой загонки $t^{\circ 3} = (800 \dots 1000)^{\circ C} = 950^{\circ C}$, по графику $D = f(t^{\circ}, N_{03}, N_{исх})$ (рис. 3.1.1) [4], определим $D_3 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$.

Время загонки вычисляется по формуле:

$$t_3 = \frac{D_3 \cdot t_3}{D_3} = \frac{2.11 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-15}} = 1055c = 17.58 \text{ мин.} \quad (3.1.5)$$

3.2 Расчёт параметров диффузии при формировании p^+ - областей (областей стока и истока p -канального транзистора)

Поскольку p^+ - области имеют высокую поверхностную концентрацию и малую глубину, то для их формирования применим одностадийный процесс термической диффузии.

Исходные данные:

Толщина областей стока и истока p -канального транзистора	$x_p = 1.9 \text{ мкм}$
Концентрация примеси истока и стока p -канального транзистора	$N_0 = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$
Концентрация примеси в подложке	$N_{исх} = N_{подл} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Расчёт параметров загонки:

Значение функции ошибок определяется по формуле:

$$\text{erfc}(V) = \text{erfc}\left(\frac{x_p}{2\sqrt{D_3 t_3}}\right) = \frac{N_{исх}}{N_0} = \frac{2 \cdot 10^{15}}{3 \cdot 10^{20}} = 6.67 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.1)$$

По таблице значений функции $\text{erfc}(V)$ (таблица 3.2.1) [4], определяется $V = 3,2$.

Таблица 3.2.1 – Значения функции $\text{erfc}(V)$

V	$\text{erfc } V$	V	$\text{erfc } V$	V	$\text{erfc } V$	V	$\text{erfc } V$
0,0	1,00000	1,0	0,15730	2,0	0,00468	3,0	0,00002209
0,1	0,88754	1,1	0,11980	2,1	0,00298	3,1	0,00001165
0,2	0,77730	1,2	0,08969	2,2	0,00186	3,2	0,00000603
0,3	0,67137	1,3	0,06599	2,3	0,00114	3,3	0,00000306
0,4	0,57161	1,4	0,04772	2,4	0,000689	3,4	0,00000152
0,5	0,47950	1,5	0,03390	2,5	0,000407	3,5	0,000000743
0,6	0,39614	1,6	0,02365	2,6	0,000236	3,6	0,000000356
0,7	0,32220	1,7	0,01621	2,7	0,000134	3,7	0,000000167
0,8	0,25790	1,8	0,01091	2,8	0,000075	3,8	0,000000077
0,9	0,20309	1,9	0,00721	2,9	0,000041	3,9	0,000000035

Произведение коэффициента диффузии на время диффузии вычисляется по формуле:

$$D \cdot t = \left(\frac{x_p}{2 \cdot V} \right)^2 = \left(\frac{1.9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,2} \right)^2 = 8.81 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2. \quad (3.2.2)$$

Задавшись температурой легирования $t^\circ = (1000 \dots 1200)^\circ\text{C} = 1200^\circ\text{C}$, по графику $D = f(t^\circ, N_{\text{оз}}, N_{\text{исх}})$ (рис. 3.1.1) [4], определим $D = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$.

Время диффузии вычисляется по формуле:

$$t = \frac{D \cdot t}{D} = \frac{8.81 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 10^{-12}} = 440.5 \text{ с} = 7,34 \text{ мин}. \quad (3.2.3)$$

3.3 Расчёт параметров диффузии при формировании n^+ - областей (областей стока и истока n -канального транзистора)

Поскольку n^+ - области имеют высокую поверхностную концентрацию и малую глубину, то для их формирования применим одностадийный процесс термической диффузии.

Исходные данные:

Толщина областей стока и истока n -канального транзистора	$x_n = 1.9 \text{ мкм}$
Концентрация примеси истока и стока n -канального транзистора	$N_0 = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Так как области стока и истока n -канального транзистора формируются в p -кармане, то исходной концентрацией примеси является концентрация, полученная после диффузии p -кармана. Её можно рассчитать по формуле:

$$N_{\text{исх}} = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p}} \cdot \exp \left(- \left(\frac{x_n}{2 \cdot \sqrt{D_p \cdot t_p}} \right)^2 \right) = \frac{4.92 \cdot 10^{12}}{\sqrt{\pi \cdot 4.81 \cdot 10^{-9}}} \cdot \exp \left(- \left(\frac{1.9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sqrt{4.81 \cdot 10^{-9}}} \right)^2 \right) = 6.13 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}. \quad (3.3.1)$$

Расчёт параметров загонки:

Значение функции ошибок определяется по формуле:

$$\text{erfc}(V) = \text{erfc} \left(\frac{x_n}{2 \sqrt{D_3 t_3}} \right) = \frac{N_{\text{исх}}}{N_0} = \frac{6.13 \cdot 10^{15}}{8 \cdot 10^{20}} = 7.66 \cdot 10^{-6} \quad (3.3.2)$$

По таблице значений функции $\text{erfc}(V)$ (таблица 3.2.1) [4], определяется $V = 3,2$.

Произведение коэффициента диффузии на время диффузии вычисляется по формуле:

$$D \cdot t = \left(\frac{x_n}{2 \cdot V} \right)^2 = \left(\frac{1.9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,2} \right)^2 = 8.81 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2. \quad (3.3.3)$$

Задавшись температурой легирования $t^\circ = (1000 \dots 1200)^\circ\text{C} = 1200^\circ\text{C}$, по графику $D = f(t^\circ, N_{\text{оз}}, N_{\text{исх}})$ (рис. 3.1.1) [4], определяем $D = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$.

Время диффузии вычисляется по формуле:

$$t = \frac{D \cdot t}{D} = \frac{8.81 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 10^{-12}} = 440.5 \text{ с} = 7,34 \text{ мин}. \quad (3.3.4)$$

4 РАСЧЁТ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНЗИСТОРОВ

4.1 Расчет пробивных напряжений р-п перехода р-карман – подложка

Расчёт для донной части перехода:

Для донной (плоской) части перехода справедлива следующая формула [5] для градиента концентрации введённой примеси:

$$\begin{aligned} a &= \frac{-Q \cdot x_n}{2 \cdot D_p \cdot t_p \cdot \sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4 \cdot D_p \cdot t_p}\right)\right) = \\ &= \frac{-4,92 \cdot 10^{12} \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4,81 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{\pi \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(2,4 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}\right)\right) = -5,00 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4} \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

В формуле (4.1.1) x_n – толщина области р-кармана.

Поскольку структура получена посредством диффузии, переход является плавным, и пробивное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\max}^3}{q \cdot |a|}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (3 \cdot 10^5)^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,00 \cdot 10^{19}}} = 204,78 \text{ В, где} \quad (4.1.2)$$

ε – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, $\varepsilon = 11,7$;

ε_0 – электрическая постоянная, $\Phi/\text{м}$;

q – элементарный заряд, Кл.

E_{\max} – напряженность электрического поля, при которой в переходе возникает лавинный пробой. Согласно [5], $E_{\max} = 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Расчёт для боковой части перехода:

Для боковой (радиусной) части перехода справедлива следующая формула для градиента концентрации введённой примеси:

$$\begin{aligned} a &= \frac{-0,5 \cdot N_{0z}}{\sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4 \cdot D_p \cdot t_p}\right)\right) = \\ &= \frac{-0,5 \cdot 3 \cdot 10^{18}}{\sqrt{\pi \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(2,4 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}\right)\right) = -6,11 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}. \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

Поскольку структура получена посредством диффузии, переход является плавным, и пробивное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\max}^3}{q \cdot |a|}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (3 \cdot 10^5)^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,11 \cdot 10^{20}}} = 58,58 \text{ В.} \quad (4.1.4)$$

4.2 Расчет пробивных напряжений р-п перехода п+-область – р-карман

Так как п+-область формируется в процессе одностадийной диффузии, то для вычисления градиента концентрации введённой примеси справедлива следующая формула:

$$\begin{aligned}
 a_{n^+} &= \frac{-N_0}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)\right) = \\
 &= \frac{-3 \cdot 10^{20}}{\sqrt{\pi \cdot 8.81 \cdot 10^{-10}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(1.9 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 8.81 \cdot 10^{-10}}\right)\right) = -2.03 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.2.1}$$

В формуле (2.3.5) x_n – толщина n+-области.

Градиент концентрации примеси в р-кармане на глубине соответствующей x_n вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 a_p &= \frac{-Q \cdot x_n}{2 \cdot D_p \cdot t_p \cdot \sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4 \cdot D_p \cdot t_p}\right)\right) = \\
 &= \frac{-4,92 \cdot 10^{12} \cdot 1,9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4,81 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{\pi \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(1,9 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 4,81 \cdot 10^{-9}}\right)\right) = -1,21 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.2.2}$$

Градиент эффективной концентрации примеси рассчитывается по формуле:

$$a_{\text{эф}} = a_{n^+} - a_p = -2.03 \cdot 10^{20} - (-1.21 \cdot 10^{20}) = -0.82 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}.
 \tag{4.2.3}$$

Пробивное напряжение вычисляется по формуле:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\max}^3}{q \cdot |a_{\text{эф}}|}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (3 \cdot 10^5)^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,82 \cdot 10^{20}}} = 159,9 \text{ В}
 \tag{4.2.4}$$

4.3 Расчет пробивных напряжений р-n перехода р+-область – подложка

Так как р+-область формируется в процессе одностадийной диффузии, то для вычисления градиента концентрации введенной примеси справедлива следующая формула:

$$\begin{aligned}
 a_{n^+} &= \frac{-N_0}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x_p^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)\right) = \\
 &= \frac{-3 \cdot 10^{20}}{\sqrt{\pi \cdot 8.81 \cdot 10^{-10}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(1.9 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 8.81 \cdot 10^{-10}}\right)\right) = -2.03 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.3.1}$$

Поскольку подложка – это пластина монокристаллического кремния, равномерно легированная донорной примесью, то градиент концентрации примеси в подложке $a_{\text{подл}} = 0$.

Градиент эффективной концентрации примеси рассчитывается по формуле:

$$a_{\text{эф}} = a_{p^+} - a_{\text{подл}} = -2,03 \cdot 10^{20} - 0 = -2,03 \cdot 10^{20}
 \tag{4.3.3}$$

Пробивное напряжение вычисляется по формуле:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{12 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\max}^3}{q \cdot |a_{\text{эф}}|}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (3 \cdot 10^5)^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,03 \cdot 10^{20}}} = 101,63 \text{ В}
 \tag{4.3.4}$$

5 РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

5.1 Расчёт пороговых напряжений для паразитного канала в n-подложке

Паразитный p-канал в подложке возникает в системе $Al-SiO_2-p-Si$ [4, 5].

Удельная ёмкость «проводник-паразитный канал» рассчитывается по формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d_0} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,9}{0,64 \cdot 10^{-4}} = 5,39 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/см}^2, \text{ где} \quad (5.1.1)$$

ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость оксида кремния, $\varepsilon = 3,9$;

d_0 – суммарная толщина подзатворного диэлектрика и изолирующего окисла, см.

Пороговое напряжение, при котором образуется паразитный канал под металлической разводкой и защитным окислом может быть оценено по формуле:

$$U_0 = \varphi_{mn} - \frac{Q_{OS}}{C_0} - 2 \cdot \varphi_F - \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n \cdot N_0 \cdot \varphi_F}}{C_0} = \quad (5.1.2)$$

$$= -0,88 - \frac{10^{-8}}{5,39 \cdot 10^{-9}} - 2 \cdot 0,31 - \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 2 \cdot 10^{15} \cdot 0,31}}{5,39 \cdot 10^{-9}} = -6,05 \text{ В}$$

N_0 – концентрация примеси на поверхности подложки, см^{-3} ;

φ_{mn} – разность работ выхода материала затвора и кремния, В. Согласно [4, 5] для системы $Al-SiO_2-p-Si$ при концентрации примеси на поверхности $N_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_{mn} = -0,88 \text{ В}$;

Q_{OS} – плотность заряда поверхностных состояний. Для кристаллографической ориентации (100) $Q_{OS} = 1,44 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ [5].

φ_F – модуль потенциала Ферми, В. Согласно [5], при $T = 300 \text{ К}$, $\varphi_F = 0,026 \ln\left(\frac{N_0}{1,38 \cdot 10^{10}}\right) = 0,31 \text{ В}$;

ε_n – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, $\varepsilon_n = 12$.

5.2 Расчёт пороговых напряжений для паразитного канала в p-кармане

Паразитный n-канал в p-кармане возникает в системе $Al-SiO_2-n-Si$ [4, 5]. Пороговое напряжение, при котором образуется паразитный канал под металлической разводкой и защитным окислом может быть оценено по формуле:

$$U_0 = \varphi_{mn} - \frac{Q_{OS}}{C_0} + 2 \cdot \varphi_F + \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n \cdot N_0 \cdot \varphi_F}}{C_0} = \quad (5.2.1)$$

$$= -0,24 - \frac{10^{-8}}{5,39 \cdot 10^{-9}} + 2 \cdot 0,39 + \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 4 \cdot 10^{16} \cdot 0,39}}{5,39 \cdot 10^{-9}} = 12,19 \text{ В}$$

где

Согласно [4, 5], для системы $Al-SiO_2-n-Si$ при концентрации примеси на поверхности $N_0 = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_{mn} = -0,24 \text{ В}$;

Модуль потенциала Ферми для данной концентрации примеси равен $\varphi_F = 0,026 \cdot \ln\left(\frac{N_0}{1,38 \cdot 10^{10}}\right) = 0,39 \text{ В}$.

Так как пороговое напряжение паразитного транзистора больше, чем напряжение питания, то необходимости применения охранных колец нет [4, 5, 6].

5.3 Расчёт пороговых напряжений в n-канальном транзисторе

Канал в n-канального транзистора является системой $Al-SiO_2-n-Si$ [4, 5]. Удельная ёмкость «затвор - канал» рассчитывается по формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d_0} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,9}{0,09 \cdot 10^{-4}} = 3,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2, \text{ где} \quad (5.3.1)$$

ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость оксида кремния, $\varepsilon = 3,9$;

d_0 – толщина подзатворного диэлектрика, см.

Пороговое напряжение, при котором образуется канал может быть оценено по формуле:

$$U_0 = \varphi_{ms} - \frac{Q_{OS}}{C_0} + 2 \cdot \varphi_F + \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n \cdot N_0 \cdot \varphi_F}}{C_0} =$$

$$= -0,24 - \frac{10^{-8}}{3,84 \cdot 10^{-8}} + 2 \cdot 0,39 + \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 4 \cdot 10^{16} \cdot 0,39}}{3,84 \cdot 10^{-8}} = 1,97 \text{ В} \quad (5.3.2)$$

где

5.4 Расчёт пороговых напряжений в p-канальном транзисторе

Канал в p-канального транзистора является системой $Al-SiO_2-p-Si$ [4, 5]. Удельная ёмкость «затвор - канал» рассчитывается по формуле:

$$U_0 = \varphi_{ms} - \frac{Q_{OS}}{C_0} - 2 \cdot \varphi_F - \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n \cdot N_0 \cdot \varphi_F}}{C_0} =$$

$$= -0,88 - \frac{10^{-8}}{3,84 \cdot 10^{-8}} - 2 \cdot 0,31 - \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 2 \cdot 10^{15} \cdot 0,31}}{3,84 \cdot 10^{-8}} = -2,88 \text{ В} \quad (5.4.1)$$

6 ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРАНЗИСТОРА

В рамках топологического расчёта транзистора проведён расчёт длины канала с учётом погрешности размеров и погрешности совмещения.

Исходные данные:

Технологическая норма (ширина затвора)	$a_{\min} = 6,0$ мкм;
Погрешность размеров	$\Delta_{\Pi} = 0,5$ мкм [7]
Погрешность совмещения	$\Delta_c = 2,0$ мкм [7]

Минимальная длина канала из условия смыкания (пробоя) областей стока и истока (за счёт расширения области пространственного заряда перехода «сток-подложка») определяется по формуле [4]:

$$L_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot U_{num}}{q \cdot N}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7 \cdot 5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{15}}} = 1,80 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,8 \text{ мкм}. \quad (6.1)$$

Реальная длина канала зависит от технологических возможностей и ограничений [5]. Из рисунка 6.1 следует, что достижимый минимум длины канала зависит от ширины поликремниевого затвора (которая является проектной нормой) и боковой диффузии y_B под маскирующий окисел, которая составляет $(0,75..0,85)x_n$. Таким образом, длина канала технологически определяется по формуле:

$$L_{\min} = a_{\min} - 2 \cdot y_B = a_{\min} - 1,6 \cdot x_n = 6 - 1,6 \cdot 1,9 = 2,96 \text{ мкм} \quad (6.2)$$

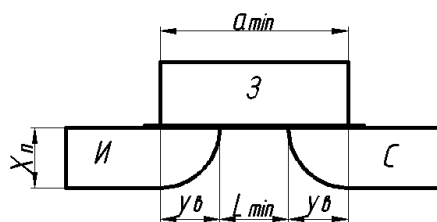


Рисунок 6.1 – Схема расчёта длины канала МДП-транзистора

Из двух значений длины канала, рассчитанным по формулам (6.1) и (6.2) было выбрано наибольшее значение $L_{\min} = 2,96 \text{ мкм}$.

7 РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНЫХ НОРМ

В таблице 3.1 приведены проектные топологические нормы для КМОП-технологического процесса изготовления микросхемы дешифратора с учетом заданных исходных данных [2], проведенных расчётов и технологических ограничений [6].

Таблица 3.1 – Проектные нормы

Чертежи топологии	Наименование элемента топологии	Обозначение	Значение, мкм
	Минимальная ширина поликремневого затвора	l_3	6
	Перекрытие областей стока (истока) затвором	i	1
	Минимальное расстояние от края контактного окна до края стока (истока), диффузионного проводника, кремниевого затвора	a	3
	Минимальный размер контактного окна к стоку (истоку) диффузионного проводнику и кремниевому затвору	$c \times c$	6×6
	Минимальное расстояние от затвора до края контактного окна к стоку (истоку)	d	5
	Перекрытие области канала затвором на его конце	e	3
	Минимальное расстояние между кремниевыми затворами	k	6
	Минимальное расстояние между проводниками металлизации	s	6
	Минимальная ширина проводников металлизации	j	6
	Перекрытие проводником металлизации контактного окна ко всем областям	t	3
	Расстояние от края кристалла до контактной площадки	u	50
	Минимальный размер контактной площадки для автоматизированной термокомпрессионной сварки	$v \times v$	150 × 150
	Минимальное расстояние между контактными площадками для автоматизированной термокомпрессионной сварки	w	50
	Расстояние между контактными площадками и другими элементами схемы	x	20

8 РАСЧЁТ ЗНАКОВ СОВМЕЩЕНИЯ

Форма знака и его местоположение должны обеспечивать быстрое и безошибочное нахождение оператором нужного знака среди прочих.

Поскольку в исходных данных отсутствует информация о проекционной установке, для определения размеров знаков совмещения остаётся довольствоваться общими рекомендациями [8]. Размеры знаков совмещения определяются по формуле:

$$A_H = A_{Ш} + 2\delta_H; \quad (8.1)$$

Размер знака на шаблоне $A_{Ш} = 10 \text{ мкм}$, номинальный зазор между знаками совмещения был выбран исходя из соотношения:

$$\delta_H = (\Delta_H + \Delta_{Ш})/2 + \Delta_{дон} = 5 \text{ мкм}, \quad (8.2)$$

где $\Delta_{дон}$ – дополнительное расширение зазора.

Размеры знаков совмещения на подложке и на шаблоне приведены на рисунке 8.1. Форма знака – неравнобокий уголок, такая форма позволяет «обслужить» до 9 топологических слоев.

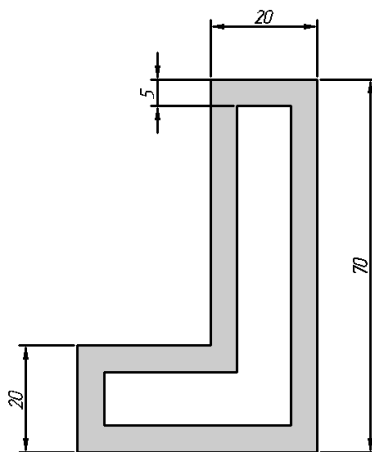


Рисунок 8.1 – Размеры и форма знаков совмещения

8.2. Схема расположения знаков совмещения на кристалле микросхемы представлена на рисунке



Рисунок 8.2 – Расположение знаков совмещения на кристалле

Способ наложения фигур совмещения представлен на рисунке 8.3.

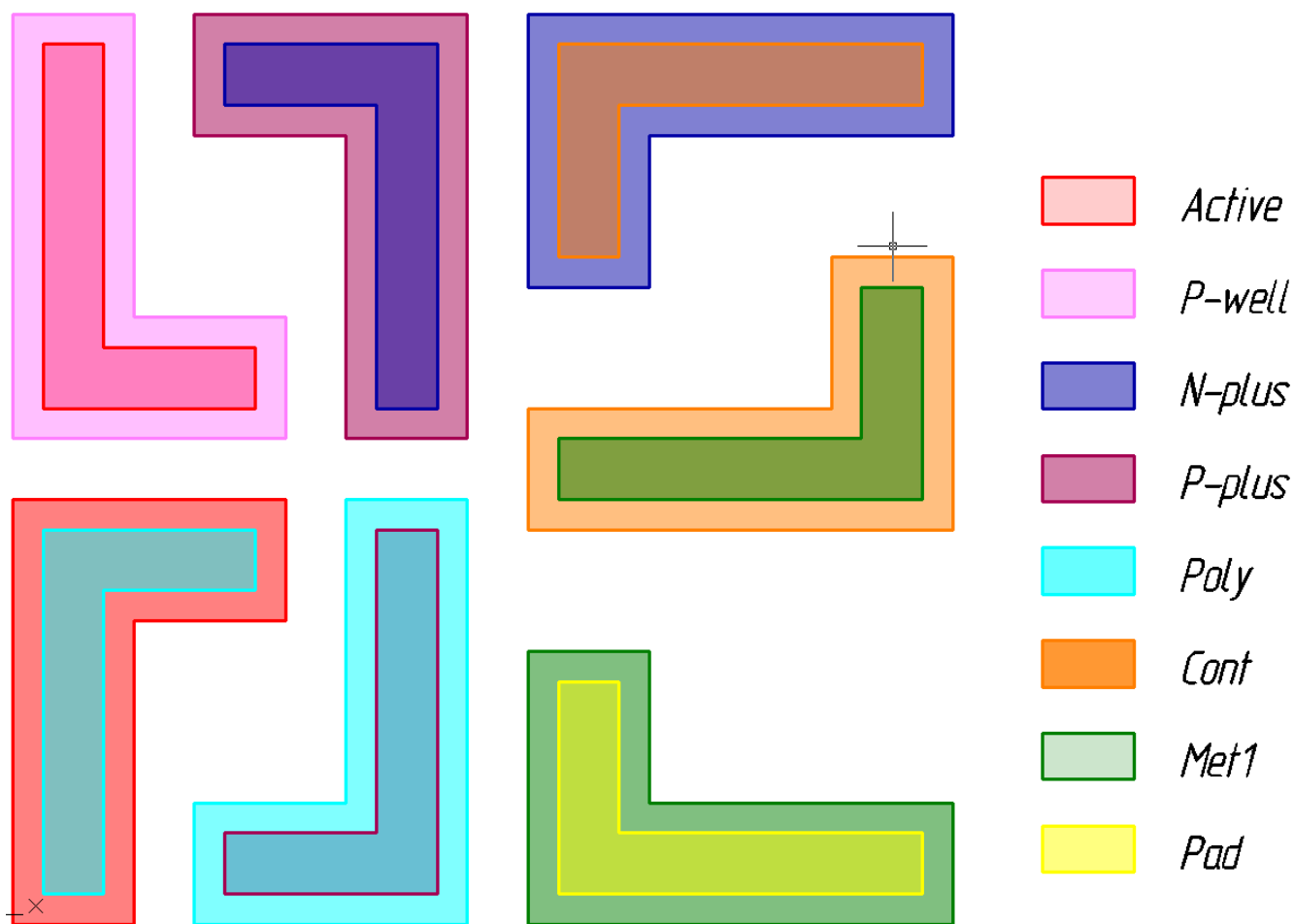


Рисунок 8.3 – Фигуры совмещения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был произведён анализ работы схемы дешифратора 4x16, её моделирование в пакете Proteuse 7. Разработана схема электрическая принципиальная дешифратора (ИУ4.92.05.00.01 Э3). Принципиальная схема была приведена в базис основных логических элементов НЕ, ЗИ-НЕ (ИУ4.92.05.00.02 Э3). Правильность преобразования схемы подтверждена результатами моделирования.

Далее, был произведён расчёт основных параметров диффузии, используемой для формирования активных областей КМОП-транзисторов. Для формирования р-карманов использовался двухстадийный процесс диффузии, для формирования n+ и р+-областей – одностадийный.

Кроме этого рп-переходы транзисторов были рассчитаны на пробивные напряжения, также был произведён расчёт пороговых напряжений каналов. По результатам расчёта для исключения образования паразитных каналов, в топологию схемы введены охранные кольца. Также была рассчитана длина канала транзистора, получаемая при заданной проектной норме и погрешностях совмещения. По результатам расчётов разработаны чертежи топологии базовых логических элементов (ИУ4.92.05.00.05).

Также в РПЗ приведён расчёт фигур совмещения для 8 слоёв топологии кристалла и общая схема размещения фигур совмещения на кристалле.

На следующем этапе была разработана схема размещения БЛЭ на кристалле микросхемы (ИУ4.92.05.00.07). На основе схемы размещения производилось проектирование топологии базового матричного кристалла.

Далее, в тексте РПЗ приведены проектные нормы, разработанные согласно расчётам, исходным данным и технологическим ограничениям. Произведено топологическое проектирование схемы дешифратора (ИУ4.92.05.00.08). Составлены послойные чертежи топологии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Уэйкерли, Дж.Ф. Проектирование цифровых устройств. / Дж.Ф.Уэйкерли. – т.1: пер. с англ. М.: Постмаркет, 2002. – 1088с.

2 Казанцев В.В. Домашнее задание по курсу «Технологические процессы микроэлектроники» // РПЗ к домашнему заданию по курсу ТПМ – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011 г. (рукопись).

3 Макарчук, В.В. Курс лекций по дисциплине «Микросхемотехника». – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010 г. (рукопись).

4 Парфенов, О.Д. Конструирование полупроводниковых интегральных схем. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1984.

5 Парфенов, О.Д. Расчёт и конструирование интегральных транзисторов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997.

6 Коледов, Л.А. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов / Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др.; Под рад. Л.А. Коледова. – М.: Высш. шк., 1984. 231 с., ил.

7 Крючков, А.А. Домашнее задание по курсу «Технологические процессы микроэлектроники» // РПЗ к домашнему заданию по курсу ТПМ – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004 г. (рукопись)

8 Парфёнов, О.Д. Топологическое проектирование микросхем высокой степени интеграции: методические указания к курсовому проектированию по курсу «Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств». – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.