

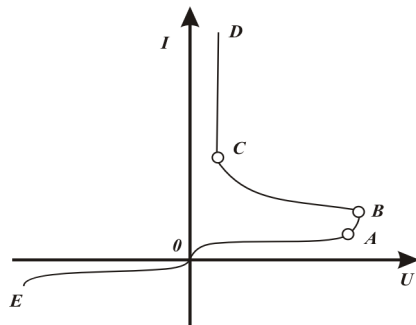
Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТИРИСТОРА

Методические указания
для выполнения курсовых работ
по дисциплине «**Физические основы электроники**»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения



Воронеж 2019

УДК 621.382.2
ББК 32.853.4

Составитель:
канд. техн. наук Т. В. Свистова

Расчет силового тиристора: методические указания для выполнения курсовых работ по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. В. Свистова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. 37 с.

Указания содержат рекомендации к выполнению задания, содержанию, защите курсовой работы и методику расчета и конструирования силового тиристора.

Предназначены для студентов бакалавриата третьего курса.

Издание подготовлено в электронном виде и содержится в файле «Му_курсовая работа_ФОЭ.pdf».

Табл. 9. Ил. 10. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.382.2
ББК 32.853.4

Рецензент - Е. Ю. Плотникова, канд. техн. наук, доц.
кафедры полупроводниковой электроники и
наноэлектроники ВГТУ

*Издается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

Введение

Студенты направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения согласно рабочей программе дисциплины «Физические основы электроники» выполняют курсовую работу.

Курсовая работа по дисциплине «Физические основы электроники» предусматривает разработку конкретного полупроводникового прибора, поэтому в задачу курсовой работы входит разработка топологии прибора, выбор его законченной конструкции и расчет основных параметров.

При выполнении курсовой работы студент должен:
научиться самостоятельно работать с технической и научной литературой;

проработать вопросы теории и конструирования полупроводниковых приборов;

обоснованно подходить к выбору технических решений при проектировании прибора;

критически оценивать результаты, полученные при расчете топологии прибора, его параметров и характеристик;

уметь четко и грамотно излагать свои мысли и наглядно представлять результаты расчетов.

1. Основные разделы курсовой работы

Курсовая работа содержит следующие разделы:

1. Задание.
2. Введение.
3. Расчетно-конструкторская часть.
4. Заключение.

Каждый студент получает индивидуальное задание. В задании приводится наименование темы и исходные данные для расчета топологии и структуры полупроводникового прибора.

Во введении указываются цели и задачи, решаемые при расчете полупроводникового прибора, подчеркивается актуальность темы работы.

В разделе работы «Расчетно-конструкторская часть» рассматриваются следующие вопросы:

а) выбор исходного материала и типа структуры проектируемого прибора;

б) расчет топологии проектируемого прибора;

в) расчет электрических параметров и характеристик полупроводникового прибора, не вошедших в задание;

г) выбор конструкции корпуса.

При выполнении расчетно-конструкторской части работы следует пользоваться методами расчетов, приведенных в рекомендуемых методических пособиях или литературе (учебниках). Все формулы, по которым проводятся расчеты тех или иных величин, должны проверяться на размерность. Все формулы, кроме тех случаев, о которых сделаны соответствующие оговорки, должны выражаться в единицах системы СИ (в метрах, килограммах, секундах, вольтах, амперах, омах, сименсах, кулонах, фарадах, генри и т.п.). Вычисления достаточно выполнять с 2 - 3 значащими цифрами в результате.

Пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии с методическими указаниями «Правила оформления выпускной квалификационной работы» и не должна содержать грамматических и синтаксических ошибок. На титульном листе указывается название дисциплины, тема курсовой работы, фамилия и инициалы студента, номер зачетки, специальность и факультет, а также вариант выполняемого задания.

2. Порядок выполнения курсовой работы и защиты

Задание на курсовую работу выдается руководителем работы. Самостоятельная работа студентов систематически контролируется и направляется руководителем работы. Руководитель курсовой работы устанавливает общее направление и со-

держание работы, консультирует студентов по всем вопросам работы, рекомендует литературу, оказывает помощь студенту при выполнении им различных разделов работы.

Полностью законченная работа сдается на проверку не позднее, чем за три рабочих дня до назначенного срока защиты. После устранения отмеченных ошибок студент допускается к защите. Дата защиты устанавливается руководителем работы. На защите могут присутствовать все желающие.

Защита курсовой работы включает доклад студента (5 - 6 минут) и ответы на вопросы. Вопросы могут задаваться как преподавателем, так и студентами, присутствующими на защите. В докладе требуется четко сформулировать задание на курсовую работу, пояснить порядок ее выполнения, изложить полученные результаты, отметить конструктивные решения и подвести итог своей работы. Задаваемые вопросы должны соответствовать теме работы и относиться к методам расчета проектируемого полупроводникового прибора, особенностям его конструкции, а также могут быть заданы вопросы по теоретическому курсу, связанному с содержанием работы.

Курсовую работу оценивается по четырех балльной системе (отл., хор., удовл., неудовл.). При оценке курсовой работы учитывается обоснованность принятых технических решений, объем использования современной вычислительной техники, оформление работы, качество расчетно-конструкторских работ, техническая эрудиция, логичность и грамотность изложения материала пояснительной записки, а также содержание доклада и ответы на вопросы, умение правильно излагать свои мысли, владеть научно-технической терминологией.

3. Расчет дискретного силового тиристора

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя и более *p-n*-переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопро-

тивлением, и который используется для переключения.

Четырехслойная тиристорная структура представлена на рис. 1. Она состоит из двух глубоких диффузионных слоев p -типа (слой p_1 является анодным эмиттером, слой p_2 – p -базой), между которыми находится слабо проводящая n -база n_1 . Диффузионный n^+ -слой образует катодный эмиттер n_2 . Слои p_1 и n_2 снабжены омическими контактами, образующими анодный и катодный выводы, а третий контакт, соединенный с p -базой, является управляющим электродом.

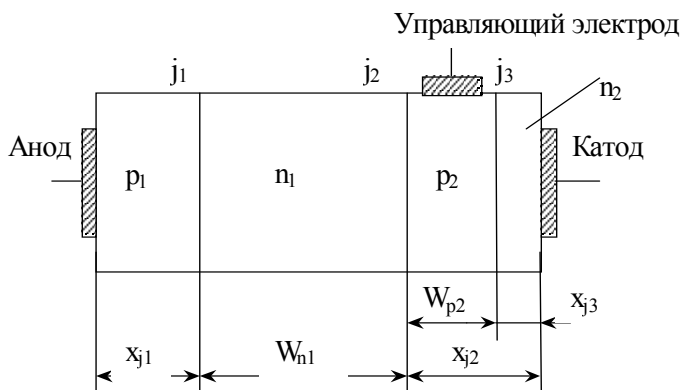


Рис. 1. Структура тиристора

В качестве примера приведем расчета дискретного силового тиристора p_1 - n_1 - p_2 - n_2 со следующими параметрами:

1) **повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии**, $U_{зс,п} = 1600$ В;

2) **средний ток в открытом состоянии**, $I_{oc,ср.} = 250$ мА;

3) **критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии**, $(dU_{зс,п}/dt)_{кр.} = 1000$ В/мкс;

4) **критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии**, $(di_{oc}/dt)_{кр.} = 5$ А/мкс;

5) **мощность, рассеиваемая корпусом**, $P_{рас.} \leq 700$ Вт.

3.1. Выбор исходного материала

Разработку тиристора рекомендуется начинать с выбора исходного материала, а именно самого полупроводника. Существует три типа полупроводниковых материалов, которые используют для производства тиристоров: германий, кремний, арсенид галлия. Преимущественно в настоящее время для создания тиристоров используется очищенной зонной плавкой и легированный фосфором кремний n -типа, так как кремний - это полупроводник с высокой температурой плавления, низкой собственной концентрацией носителей, умеренно широкой запрещенной зоной и высоким временем жизни носителей заряда, кроме этого существует современная промышленная технология его изготовления.

Требуемое значение удельного сопротивления исходного кремния (n_1 – база) ρ_{n1} зависит от напряжения лавинного пробоя p - n -перехода ($U_{\text{проб.}}$), которое определяется по заданному значению повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии $U_{\text{зс.,п}}$ и коэффициенту запаса $k_n = 0,75$:

$$U_{\text{зс.,п}} = k_n \cdot U_{\text{проб.}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{проб.}} = U_{\text{зс.,п}} / k_n. \quad (2)$$

$$U_{\text{проб.}} = 1600 / 0,75 = 2130 \approx 2200 \text{ (В)}.$$

Полученное значение округляем в большую сторону.

По рассчитанному значению пробивного напряжения p - n -перехода определим концентрацию примеси N_d в n -типе кремния. Приближенное значение N_d определяется по формуле, справедливой для резкого p - n -перехода:

$$N_d = N_{n1} \approx A_1 \cdot U_{\text{проб.}}^{-1} [\ln (B_1 \cdot U_{\text{проб.}})]^{-2} \quad (3)$$

где $A_1 = 9 \cdot 10^{18} \text{ В/см}^3$, $B_1 = 1,2 \text{ В}^{-1}$.

$$N_d = N_{n1} \approx 9 \cdot 10^{18} \cdot 2200^{-1} [\ln(1,2 \cdot 2200)]^{-2} = 6,6 \cdot 10^{13} \text{ (см}^{-3}\text{)}.$$

Зная теперь концентрацию примеси (N_d), по графику зависимости удельного сопротивления (ρ) от концентрации примеси $N_d(\rho)$ (рис. 2) находим удельное сопротивление $\rho_{n1} = 80 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и выбираем марку кремния. Марка кремния должна иметь следующий вид, например: 2Г КЭФ-80/0,1, где 2Г – группа кремния, которая характеризует диапазон удельного сопротивления; К – кремний, Э – электронного типа, Ф – легированный фосфором; 80 Ом·см – удельное сопротивление (ρ_{n1}); 0,1 мм – диффузионная длина неосновных носителей в базе n_1 (L_p), значение которой выясняется при дальнейших расчетах. В табл. 1 приведены группы кремния, которые характеризуют диапазон удельного сопротивления.

Таблица 1

Группы кремния по диапазону удельного сопротивления

Группа	Диапазон удельного сопротивления, Ом·см
1А	1 - 15
1Б	1 - 20
2А	15 - 25
2Б	25 - 45
2В	40 - 75
2Г	50 - 140
2Д	100 - 250
2Е	500 - 2000
3А	0,005 - 1,0
3Б	0,008 - 1,0
3В	0,005 - 0,1

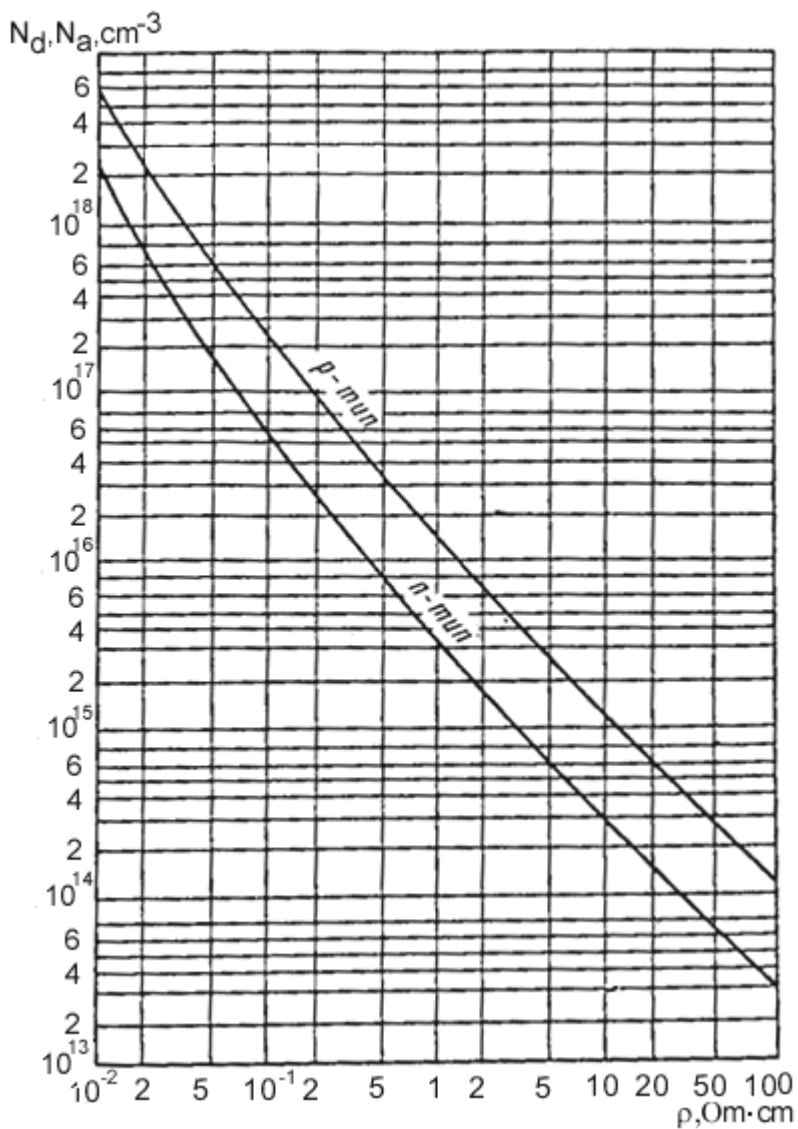


Рис. 2. Связь между сопротивлением кремния *p*-и *n*-типа и концентрацией примеси

3.2. Расчет параметров конструкции тиристора

Определим предельную толщину слоя объемного заряда коллекторного перехода W_{on} в n_I -базе:

$$W_{on} = 0,52 \cdot \sqrt{\rho_{n1} \cdot U_{проб}} \text{ [мкм]}, \quad (4)$$

или

$$W_{on} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{проб}}{qN_{n1}}}, \quad (5)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость кремния, $\varepsilon = 12$;
 ε_0 - электрическая постоянная;
 q - заряд электрона.

$$W_{on} = 0,52 \cdot \sqrt{80 \cdot 2200} = 218,1 \text{ (мкм)}$$

$$W_{on} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 2200}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{13}}} = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ (см)} = 220 \text{ мкм}$$

Выбираем предельную толщину слоя объемного заряда коллекторного перехода $W_{on} = 220$ мкм.

Толщину базы n_1 W_{n1} , как правило, определяют из двух условий:

$$\text{ch}\left(\frac{W_{n1} - W_{on}}{L_p}\right) = k_1, \quad (6)$$

$$\frac{W_{n1} + \Delta W}{1,2 \cdot L_p} = k_2, \quad (7)$$

где $k_1^{-1} = 1 - \left(\frac{U_{\text{прк}}}{U_{\text{проб.}j_2}} \right)^n$, n – показатель степени в формуле

Мюллера обычно принимают от 3 до 9 для кремниевых переходов, отношение напряжения переключения к напряжению

пробоя перехода $j_2 \frac{U_{\text{прк}}}{U_{\text{проб.}j_2}} = 0,8 - 0,9$;

ΔW – увеличение эффективной толщины базы;

L_p – диффузионная длина дырок в базе n_1 ;

k_2 – коэффициент для обеспечения приемлемых значений напряжения в открытом состоянии. Обычно принимают $k_2 = 3$, а для быстродействующих тиристоров $k_2 = 4 - 5$.

Эффективная толщина базы тиристора в открытом состоянии при высоких плотностях тока увеличивается примерно на $\Delta W \approx x_{j1} + x_{j2} - 50$ [мкм]. В этом выражении x_{j1} и x_{j2} – глубины залегания переходов j_1 и j_2 соответственно (см. рисунок 1), которые для реальных тиристоров обычно имеют величину от 75 до 125 мкм. Глубина залегания перехода j_3 колеблется обычно в пределах от 15 до 25 мкм.

Из условия (6) и (7) получаем формулы для вычисления толщины n_1 -базы (W_{n1} , мкм) и времени жизни дырок в n_1 -базе (τ_p^{n1} , мкс):

$$W_{n1} = \frac{1,2 \cdot k_2 \cdot W_{on} + \Delta W \cdot \text{arch}(k_1)}{1,2 \cdot k_2 - \text{arch}(k_1)}, \quad (8)$$

$$\tau_p^{n1} = \left(\frac{W_{n1} + \Delta W}{125} \right)^2. \quad (9)$$

В рассматриваемом нами примере, принимая $\rho_{n1} = 80$ Ом·см и $W_{on} = 220$ мкм и полагая далее, что $x_{j1} = x_{j2} = 100$ мкм, $\Delta W \approx 100 + 100 - 50 = 150$ мкм. Примем также, что

$n = 8$, а отношение $\frac{U_{\text{прк}}}{U_{\text{проб. } j_2}} = 0,8$, тогда $k_1^{-1} = 1 - (0,8)^8 = 0,8$, а $k_1 = 1,2$, полагая $k_2 = 3$ по формулам (8) и (9) получаем

$$W_{n1} = \frac{1,2 \cdot 3 \cdot 220 + 150 \cdot \text{arch}(1,2)}{1,2 \cdot 3 - \text{arch}(1,2)} = 290 \text{ (мкм)},$$

$$\tau_p^{n1} = \left(\frac{290 + 150}{125} \right)^2 = 12 \text{ (мкс)}.$$

Общая толщина тиристорной структуры:

$$W_{Si} = W_{n1} + x_{j1} + x_{j2} \text{ [мкм]}. \quad (10)$$

$$W_{Si} = 290 + 100 + 100 = 490 \text{ (мкм)}.$$

Напряжение прокола несимметричного резкого p - n -перехода:

$$U_{\text{прок}} = \frac{qN_{n1}W_{n1}^2}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (11)$$

$$U_{\text{прок}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{13} (290 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 3800 \text{ (В)}$$

Определим параметры технологической шунтировки перехода j_3 . Этот расчёт проводят по заданному значению критической скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии $(dU_{\text{зс.п}}/dt)_{\text{кр}}$, которое устанавливается при $T=125 \text{ }^\circ\text{C}$, и постоянном напряжении в закрытом состоянии $U_{\text{зс}} = 0,67 \cdot U_{\text{зс.п}} = 0,67 \cdot 1600 = 1072 \text{ (В)}$.

Толщина слоя объёмного заряда в n_1 -базе с учётом напряжения в закрытом состоянии $U_{\text{зс}}$:

$$W_{on1} = 0,52 \cdot \sqrt{\rho_{n1} \cdot U_{3c}} \text{ [мкм]}. \quad (12)$$

$$W_{on1} = 0,52 \cdot \sqrt{80 \cdot 1072} = 150 \text{ (мкм)}$$

Определяем эффективную толщину базового слоя n_1 :

$$W_{n1}^* = W_{n1} - W_{on1} \text{ [мкм]}. \quad (13)$$

$$W_{n1}^* = 290 - 150 = 140 \text{ (мкм)}$$

Определяем эффективную толщину базового слоя p_2 :

$$W_{p2}^* \approx x_{j2} - x_{j3} - W_{op2} \text{ [мкм]}, \quad (14)$$

где W_{op2} - толщина слоя объёмного заряда коллекторного перехода в p_2 -базе.

Толщина слоя объёмного заряда коллекторного перехода в p_2 -базе определяется как:

$$W_{op2} = \frac{1}{a_1} \ln \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 a_1 E_M}{q N_{n1}} \right), \quad (15)$$

где a_1 – градиент примеси в p - n переходе при $x = x_{j2}$,

$$a_1 = \frac{2}{x_{j2}} \ln \left(\frac{N_S}{N_{n1}} \right), \quad (16)$$

$$E_M \approx \frac{2U_{3c}}{W_{on1}}. \quad (17)$$

В формулы (16) и (17) величины W_{on1} и x_{j2} подставляем в сантиметрах.

Для создания p -областей тиристора обычно используют

такие легирующие примеси, как галлий, алюминий или бор. Преобладает диффузия галлия или алюминия с поверхностной концентрацией примеси N_S в пределах $(5 \cdot 10^{16} - 10^{19}) \text{ см}^{-3}$.

$$E_M \approx \frac{2 \cdot 1072}{150 \cdot 10^{-4}} = 1,43 \cdot 10^5 \text{ (В/см)},$$

$$a_1 = \frac{2}{100 \cdot 10^{-4}} \ln \left(\frac{5 \cdot 10^{16}}{6 \cdot 10^{13}} \right) = 1350 \text{ см}^{-1},$$

$$W_{\text{оп2}} = \frac{1}{1350} \ln \left(\frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1350 \cdot 1,43 \cdot 10^5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{13}} \right) = 22 \cdot 10^{-4} \text{ (см)} = \\ = 22 \text{ (мкм)}.$$

Выбираем $x_{j3} = 20 \text{ мкм}$ $W_{p2}^* \approx 100 - 20 - 22 = 52 \text{ (мкм)}$.

При известных значениях W_{n1}^* и W_{p2}^* рассчитываем постоянную времени нарастания прямого тока τ_H как положительный корень следующего трансцендентного уравнения:

$$\frac{1}{\text{ch} \left(\frac{W_{n1}^*}{L_p} \sqrt{1 + \frac{\tau_p^{n1}}{\tau_H}} \right)} + \frac{1}{\text{ch} \left(\frac{W_{p2}^*}{L_n} \sqrt{1 + \frac{\tau_n^{p2}}{\tau_H}} \right)} = 1, \quad (18)$$

где L_p и L_n - диффузионные длины дырок в p_1 -базе и электронов в p_2 -базе;

τ_p^{n1} и τ_n^{p2} - время жизни дырок в p_1 -базе и электронов в p_2 -базе.

Время жизни дырок в p_1 -базе τ_p^{n1} рассчитано ранее по (9), а время жизни электронов в p_2 -базе τ_n^{p2} обычно принимается равным $(0,1 - 0,4) \tau_p^{n1}$. Диффузионные длины дырок в p_1 -базе и электронов в p_2 -базе соответственно:

$$L_p = \sqrt{\tau_p^{n1} D_p}, \quad (19)$$

$$L_n = \sqrt{\tau_n^{p2} D_n}, \quad (20)$$

где D_n и D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно. При температуре 20°C $D_n = 33 \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_p = 12 \text{ см}^2/\text{с}$, при температуре 125°C $D_n = 22 \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_p = 8 \text{ см}^2/\text{с}$.

Примем $\tau_n^{p2} = 0,16$ $\tau_p^{n1} = 0,16 \cdot 12 = 2 \text{ мкс}$.

$$L_p = \sqrt{12 \cdot 10^{-6} \cdot 8} = 98 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 98 \text{ мкм}$$

$$L_n = \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 22} = 66 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 66 \text{ мкм}$$

Постоянную времени нарастания прямого тока τ_n определяют графически. Для этого строят график функции $f(\tau_n)$, задавая значения $\tau_n = 1, 2, 3 \dots \text{ мкс}$:

$$f(\tau_n) = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{W_{n1}^*}{L_p} \sqrt{1 + \frac{\tau_p^{n1}}{\tau_n}}\right)} + \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{W_{p2}^*}{L_n} \sqrt{1 + \frac{\tau_n^{p2}}{\tau_n}}\right)} - 1. \quad (21)$$

$$f(\tau_n) = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{140}{98} \sqrt{1 + \frac{12}{\tau_n}}\right)} + \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{58}{66} \sqrt{1 + \frac{2}{\tau_n}}\right)} - 1$$

Результаты расчета по формуле (21) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Определение постоянной времени нарастания прямого тока τ_H

$\tau_H, \text{мкс}$	1	2	3	4	5	6
$f(\tau_H)$	-0,5	-0,3	-0,22	-0,12	0,024	0,05

Точка пересечения графика с осью абсцисс и даст искомое значение $\tau_H = 4,7 \text{ мкс}$ (см. рис. 3).

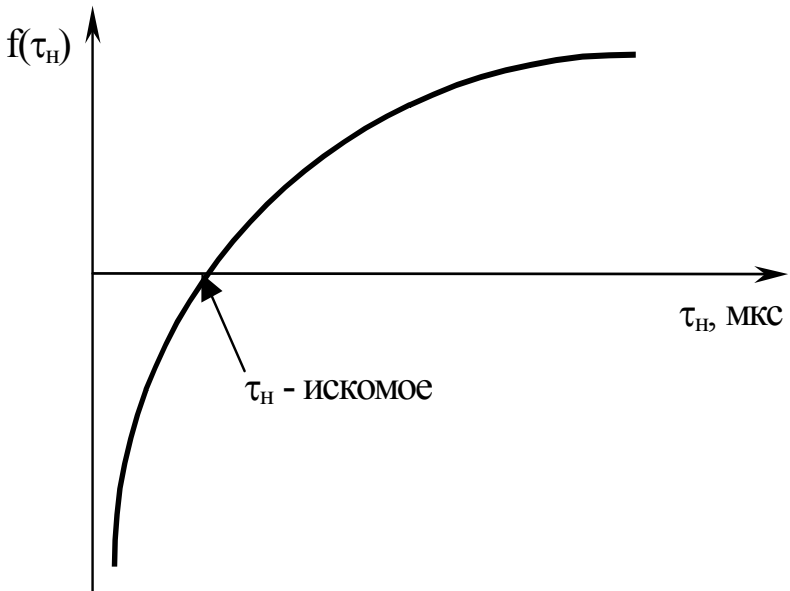


Рис. 3. Определение постоянной времени нарастания тока τ_H в открытом состоянии тиристора

Расчитав постоянную времени нарастания прямого тока, вычислим плотность критического заряда включения тиристора, обеспечивающую заданное значение $(dU_{зс,п}/dt)_{кр}$:

$$Q_{кр} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \varepsilon \varepsilon_0 q N_{nl} \tau_H \left(\frac{dU_{зс,п}}{dt} \right)_{кр}} F \left(\sqrt{\frac{U_{зс}}{\tau_H} \left(\frac{dU_{зс,п}}{dt} \right)_{кр}^{-1}} \right), \quad (22)$$

где $F \left(\sqrt{\frac{U_{зс}}{\tau_H} \left(\frac{dU_{зс,п}}{dt} \right)_{кр}^{-1}} \right)$ - интеграл вероятности функции

ошибок, определяется по графику, приведенному на рисунке 4.

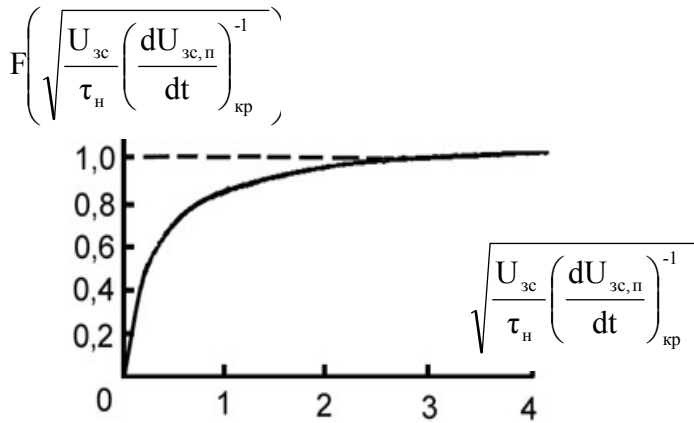


Рис. 4. Интеграл вероятности функции ошибок

$$F \left(\sqrt{\frac{1072}{4,7} (1000)^{-1}} \right) = F(0,23) = 0,6$$

$$Q_{кр} = \sqrt{\frac{3,14}{2} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{-13} \cdot 4,7 \cdot 1000 \cdot 0,6} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$$

Зная $Q_{кр}$, рассчитаем плотность тока утечек через переход j_3 :

$$j_{\text{ут.}} = \frac{Q_{\text{кр}}}{\tau_{\text{H}}} \left[1 - \frac{1}{\text{ch} \left(\frac{W_{\text{nl}}^*}{L_{\text{p}}} \sqrt{1 + \frac{\tau_{\text{p}}^{\text{nl}}}{\tau_{\text{H}}}} \right)} \right]^{-1}. \quad (23)$$

$$j_{\text{ут.}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-7}}{4,7 \cdot 10^{-7}} \left[1 - \frac{1}{\text{ch} \left(\frac{140}{98} \sqrt{1 + \frac{12}{4,3}} \right)} \right]^{-1} = 4,36 \cdot 10^{-2} \text{ (A/cm}^2\text{)}.$$

Рассчитаем удельное сопротивление и концентрацию акцепторов в p_2 -базе:

$$\rho_{p2} = R_{\text{sp2}} W_{p2}^*, \quad (24)$$

где R_{sp2} - сопротивление растекания базового слоя p_2 . Типичное значение R_{sp2} для тиристоров от 200 до 400 Ом. Сопротивление растекания базового слоя p_2 зависит от температуры $R_{\text{sp2}} \sim T^{2,5}$. Выбираем $R_{\text{sp2}} = 300$ Ом, тогда удельное сопротивление

$$\rho_{p2} = 300 \cdot 58 \cdot 10^{-4} = 1,8 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}.$$

По известному удельному сопротивлению ρ_{p2} можно определить концентрацию акцепторов p_2 -базе (N_{p2}) по графику зависимости $\rho(N_a)$ (см. рис. 2): $N_{p2} = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Рассчитаем равновесную концентрацию электронов в p_2 -базе при предельной температуре 125 °С. Учтем, что при 20 °С собственная концентрация носителей в кремнии $n_i = 1,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а при 125 °С $n_i = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$:

$$n_{p2} = \frac{n_i^2}{N_{p2}}, \quad (25)$$

$$n_{p2} = \frac{(6 \cdot 10^{12})^2}{7,5 \cdot 10^{15}} = 4,8 \cdot 10^9 \text{ (см}^{-3}\text{)}.$$

Рассчитаем коэффициент переноса дырок через n_1 -базу:

$$\beta_{n1} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{W_{n1}^*}{L_p}\right)}. \quad (26)$$

$$\beta_{n1} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{140}{98}\right)} = 0,56.$$

Рассчитаем коэффициент переноса электронов через p_2 -базу:

$$\beta_{p2} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{W_{p2}^*}{L_n}\right)}. \quad (27)$$

$$\beta_{p2} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{58}{66}\right)} = 0,79.$$

Рассчитаем плотность тока насыщения через переход j_3 при предельной температуре 125 °С:

$$j_{Sj3} = \frac{qD_n n_{p2}}{L_n \operatorname{th}\left(\frac{W_{p2}^*}{L_n}\right)}. \quad (28)$$

$$j_{Sj3} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 22 \cdot 4,8 \cdot 10^9}{82 \cdot 10^{-4} \operatorname{th}\left(\frac{58}{66}\right)} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ (A/cm}^2\text{)}.$$

Рассчитаем сопротивление технологической шунтировки единицы площади третьего перехода j_3 . Шунты предназначаются для закорачивания эмиттерного перехода тиристора, улучшения прямого напряжения пробоя и стойкости прибора к эффекту dU/dt .

$$R_{yt} = \frac{kT}{qj_{yt}} \ln\left(\frac{kT}{q R_{yt} j_{Sj3}} \frac{1}{\beta_{n1} + \beta_{p2} - 1}\right). \quad (29)$$

Левую часть выражения (29) можно обозначить через $Z(R_{yt})$ и построить график зависимости, задавая значения $R_{yt} = 1, 2, 3, \dots$ Ом·см². Точка пересечения графика с прямой, проведенной из начала координат $R_{yt} = Z(R_{yt})$, дает значение R_{yt} (рис. 5).

$$Z(R_{yt}) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,36 \cdot 10^{-2}} \ln\left(\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{1}{R_{yt} \cdot 3,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1 - 0,56}{0,56 + 0,79 - 1}\right).$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение сопротивления технологической шунтировки
перехода j_3 тиристора R_{yt}

$R_{yt}, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	1	2	3	4	5
$Z(R_{yt}), \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	5,4	5,02	4,8	4,6	4,5

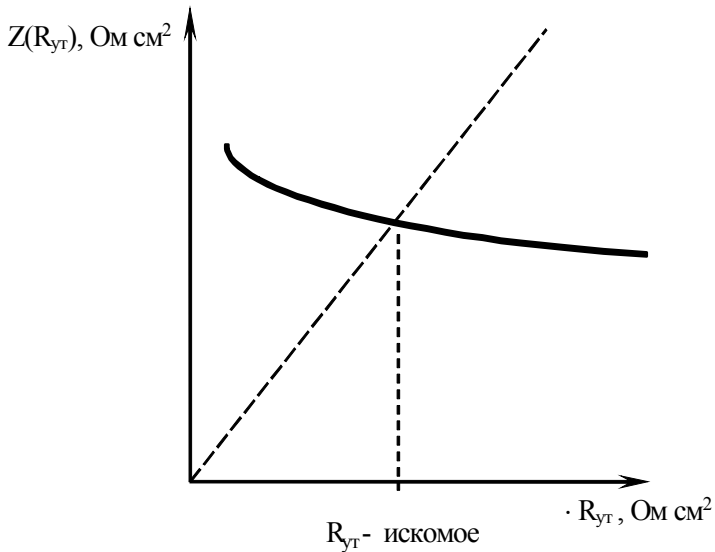


Рис. 5. Определение сопротивления технологической шунтировки перехода j_3 тиристора R_{yt}

Сопротивления технологической шунтировки перехода j_3 тиристора $R_{yt} = 4,3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Зная R_{yt} и задавшись величиной диаметра технологического шунта $d_{ш} = 0,025 \text{ см}$, расстояние между центрами соседних шунтов можно рассчитать по формуле

$$L_o = \sqrt{\frac{8R_{\dot{\phi}}}{R_{sp2}}} \left\{ \ln\left(\frac{L_o}{d_o}\right) - \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{d_o}{L_o}\right)^2 \right] \right\}^{-0,5} \quad (30)$$

Из формулы (30) выразим R_{yT} через $L_{ш}$:

$$R_{yT} = \frac{1}{8} L_{ш}^2 R_{sp2} \left\{ \ln\left(\frac{L_{ш}}{d_{ш}}\right) - \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{d_{ш}}{L_{ш}}\right)^2 \right] \right\}. \quad (31)$$

Задачу вычисления расстояния между шунтами решим графически, построив график зависимости $R_{yT}(L_{ш})$, и по известному R_{yT} определим искомое расстояние между шунтами. $L_{ш}$ задаем от 0,08 до 0,22 см (рис. 6). Значение R_{sp2} подставляется при температуре 125 °С. $R_{sp2} = 300$ Ом при температуре 25 °С и $R_{sp2} = 612$ Ом при температуре 125 °С.

$$R_{yT} = \frac{1}{8} L_{ш}^2 \cdot 612 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{L_{ш}}{0,025}\right) - \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{0,025}{L_{ш}}\right)^2 \right] \right\}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Определение расстояния между центрами соседних шунтов
перехода j_3 тиристора $L_{ш}$

$L_{ш}, \text{см}$	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
$R_{yT},$ Ом·см ²	0,34	0,69	1,2	1,82	2,63	3,6	4,95	6

Расстояния между центрами соседних шунтов перехода j_3 тиристора $L_{ш} = 0,19 \text{ см} = 1,9 \text{ мм}$.

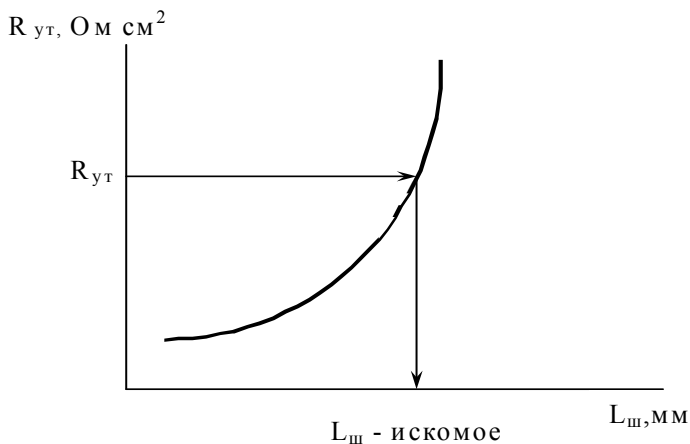


Рис. 6. Определение расстояния между центрами соседних шунтов перехода j_3 тиристора $L_{ш}$

3.3. Расчет диаметра тиристорного элемента и выбор конструкции корпуса

Рассчитываем зависимость напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора:

$$U_{np} = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{j_{np}}{j_{Si}}\right) + 1,5 \frac{kT}{q} \exp\left(\frac{W_{Si} - 50}{2,4L_p}\right) + 6 \cdot 10^{-6} (W_{Si} - 50)j_{np}, \quad (32)$$

где W_{Si} и L_p , мкм;

j_{np} – плотность прямого тока, А/см²;

j_{Si} – плотность тока через кремниевую структуру рас-

считывается по формуле $j_{Si} = \frac{qD_p n_i}{L_p}$ при $T = 20$ °С.

$$j_{Si} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 1,9 \cdot 10^{10}}{120 \cdot 10^{-4}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ A/M}^2.$$

Зависимость напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора имеет вид

$$U_{i0} = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-9}} \ln \left(\frac{j_{i0}}{3 \cdot 10^{-6}} \right) + 1,5 \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-9}} \exp \left(\frac{400 - 50}{24 \cdot 98} \right) + 6 \cdot 10^{-6} (400 - 50) j_{i0}.$$

Результаты расчета сведены в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора

$j_{пр}, \text{ A/cm}^2$	$U, \text{ В}$
20	1,05
50	1,2
100	1,34
200	1,64
300	1,93
400	2,2
500	2,48
600	2,76
700	3,03
800	3,29
900	3,57
1000	3,83

Зависимость напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора имеет вид, приведенный на рис. 7.

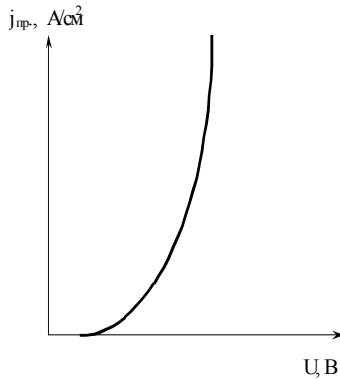


Рис. 7. Зависимость напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора

Рассчитываем радиальный размер фаски. Для защиты р-п-п структур силовых тиристоров от поверхностного пробоя используют фаски. Для тиристоров используется, как правило, двухступенчатая фаска (рис. 8).

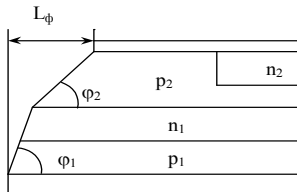


Рис. 8. Двухступенчатая фаска в тиристорах

Угол φ_1 - выбирается в пределах $(30 - 45)^\circ$, а угол φ_2 , определяющий стойкость к поверхностному пробоя коллекторного перехода, в пределах $(1,5 - 4)^\circ$. Такая фаска широко используется для тиристоров с напряжением переключения до 4000 В. Радиальный размер фаски определяется как:

$$L_{\phi} = 3 \exp(0,00018 U_{зс.п}) - 2 \text{ [мм]}. \quad (33)$$

$$L_{\phi} = 3 \exp(0,00018 \cdot 1600) - 2 = 2 \text{ (мм)}.$$

Определяем коэффициент, учитывающий потери активной площади за счет технологической шунтировки перехода j_3 . Катодные шунты обычно имеют круглую форму и располагаются по площади эмиттера в виде регулярной системы с квадратным или треугольным расположением (рис. 9).

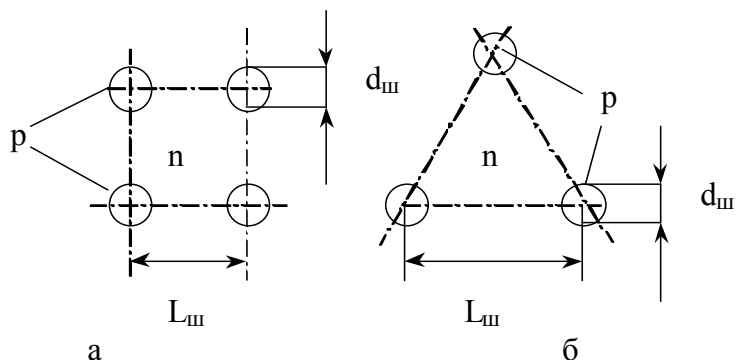


Рис. 9. Расположение шунтов катодного эмиттера: а – квадратное расположение; б – треугольное расположение

Наличие эмиттерных шунтов приводит к потере общей площади эмиттера, а, следовательно, и нагрузочного тока.

Коэффициент, учитывающий потери активной площади за счет технологической шунтировки перехода j_3 :

при расположении шунтов по вершинам квадратов:

$$k_{ш} = 1 - \frac{\pi d_{ш}^2}{4L_{ш}^2}, \quad (34)$$

при расположении шунтов по вершинам треугольников:

$$k_{\text{ш}} = 1 - \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{3,5L_{\text{ш}}^2}. \quad (35)$$

При треугольном распределении диаметр шунта больше, чем при квадратном, что позволяет легче реализовать данную форму, а также шунты находятся на большем расстоянии друг от друга, что способствует меньшему влиянию шунтирования на скорость распространения проводящей плазмы.

Выбираем расположения шунтов по вершинам треугольников:

$$k_{\text{ш}} = 1 - \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{3,5 \cdot 0,19^2} = 0,98$$

Задаёмся различными значениями диаметра выпрямительного элемента $d_{\text{вэ}}$ и рассчитываем активную площадь структуры тиристора:

$$S_{\text{акт}} = k_{\text{ш}} \left[\frac{\pi}{4} (d_{\text{вэ}} - 2L_{\phi})^2 - S_y \right], \quad (36)$$

где S_y – площадь, занимаемая управляющим электродом.

Значения $d_{\text{вэ}}$ тиристоров стандартизованы и берутся из ряда чисел: 6, 8, 10, 13, 16, 18, 20, 24, 32, 40, 50, 56, 65, 80, 100, 125, 160, 200 мм. Кроме того, допускаются, но не рекомендуются 22, 25, 27 и 30 мм. При диаметрах выпрямительного элемента менее 18 мм площадь, занимаемая управляющим электродом, имеет величину от 0,05 до 0,1 см²; при диаметрах от 18 до 40 мм - 0,2 см²; от 40 до 60 мм – 0,5 см²; при диаметрах более 60 мм площадь управляющего электрода не менее 1 см².

Результаты расчета сводим в табл. 7.

Вычисляем плотность тока через структуру при прямом токе, равном $2,5 I_{oc.cр.}$ и разных значениях $d_{вз}$:

$$j_{пр}^* = \frac{2,5 I_{oc.cр.}}{S_{акт}}. \quad (37)$$

Зная плотности тока, по графику зависимости напряжения в открытом состоянии от плотности тока тиристора (рис.7) определяем значение прямого напряжения и рассчитываем среднюю мощность прямых потерь $P_{oc.cр.}$ для разных значений $d_{вз}$:

$$P_{oc.cр.} = I_{oc.cр.} U_{пр}(j_{пр.}) \quad (38)$$

Результаты расчета сведем в табл. 6. Затем строим график зависимости $P_{oc.cр.}(d_{вз})$ (рис. 10).

Наряду с графиком зависимости $P_{oc.cр.}(d_{вз})$ рассчитываем графики зависимости мощности, рассеиваемой корпусом тиристора штыревой и таблеточной конструкции при заданных значениях максимально допустимой температуры структуры и температуры корпуса, и строим их на графике $P_{oc.cр.}(d_{вз})$ (см. рис. 10):

$$P_{рас.} = (T_{пер} - T_{кор})/R_{т(п-к)}, \quad (39)$$

где $T_{пер}$ - температура перехода;

$T_{кор}$ - температура корпуса;

$R_{т(п-к)}$ – тепловое сопротивление переход-корпус.

Для построения графика зависимости (39) можно пользоваться приближенными значениями тепловых сопротивлений переход-корпус тиристорov, приведенными в табл. 7.

Таблица 7

Средняя мощность прямых потерь $P_{\text{ос.ср.}}$
при разных значениях $d_{\text{вэ}}$

$d_{\text{вэ}}, \text{см}$	$S_{\text{ак}}, \text{см}^2$	$j^*_{\text{пр}}, \text{А/см}^2$	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	$P_{\text{ос.ср.}}, \text{Вт}$
1,8	1,3	480	2,4	600
2,0	1,75	357	2,1	525
2,2	2,26	277	1,8	450
2,4	2,8	223	1,7	425
2,6	3,45	181	1,6	400
2,8	4,13	151	1,5	375
3,0	4,88	128	1,4	350
3,2	5,7	110	1,3	325

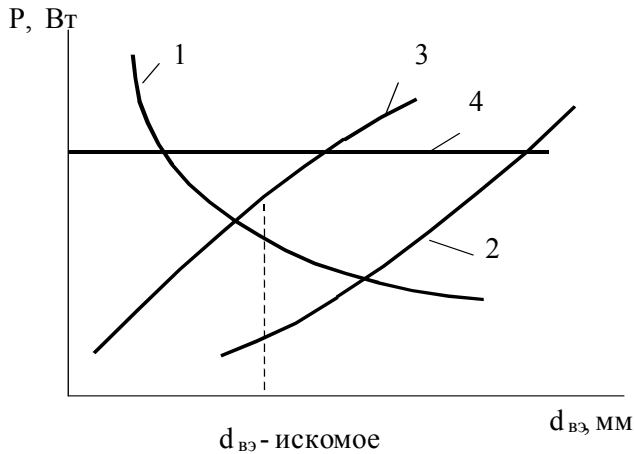


Рис. 10. Зависимость мощности тиристора от диаметра:
1 – средняя мощность прямых потерь в открытом состоянии;
2 - мощность, рассеиваемая корпусом тиристора штыревой конструкции; 3 - мощность, рассеиваемая корпусом тиристора таблеточной конструкции; 4 – заданная мощность, рассеиваемая корпусом выпрямительного элемента

Таблица 8

Значения тепловых сопротивлений
переход-корпус тиристоров

Диаметр выпрямительного элемента, $d_{вэ}$, мм	Тепловое сопротивление переход- корпус $R_{т(п-к)}$, °С/Вт		
	Штыревой корпус		Табле- точный корпус
	паяные контакты	прижимные контакты	
6	2,3	-	-
8	1,4	-	-
10	1,2	-	-
13	0,7	0,4	-
16	0,4	-	-
18	-	0,26	-
20	-	-	0,11
24	-	0,16	0,08
32	-	0,1	0,055
40	-		0,04
50	-		0,03
56	-		0,025
65	-		0,02
80	-		0,015

Если нет специальных ограничений, значение максимально допустимых температур переходов тиристоров $T_{пер}$ устанавливаются в зависимости от их повторяющихся импульсных обратных напряжений $U_{зс.п.}$. Значения температур корпусов, при которых устанавливаются предельные токи тиристоров, также зависят от $U_{зс.п.}$. Обычно если $U_{зс.п.}$ не более 1600 В температура перехода 190 °С, а температура корпуса 125 °С. Результаты расчета приведены в табл. 8.

Таблица 9

Мощность, рассеиваемая корпусом тиристора

Диаметр выпрямительного элемента, $d_{вз}$, мм	Мощность, рассеиваемая корпусом тиристора	
	Штыревой корпус	Таблеточный корпус
18	250	-
20	-	590
24	406	812
32	650	1182

Диаметр выпрямительного элемента выбирают так, чтобы мощность, рассеиваемая корпусом той или иной конструкции $P_{рас}$, была не менее $P_{ос.ср}$, но и не более $P_{рас}$, заданной в задании. При выборе $d_{вз}$ исходят также из минимальных затрат материала. Диаметр выпрямительного элемента должен быть из стандартного ряда. В рассматриваемом примере $d_{вз} = 2,4$ см. Для выбранного диаметра выпрямительного элемента вычисляют активную площадь структуры тиристора по (36). Здесь же выбирают тип конструкции корпуса тиристора.

$$S_{акт} = 0,98 \left[\frac{3,14}{4} (2,4 - 2 \cdot 0,19)^2 - 0,2 \right] = 2,8 \text{ см}^2$$

Выбираем таблеточную конструкцию корпуса.

3.4. Расчет основных параметров тиристорov

1. Импульсное напряжение в открытом состоянии $U_{ос.и}$ определяют следующим образом. При выбранном $d_{вз}$ и известном $S_{акт}$ рассчитываем плотность прямого тока, соответ-

ствующую току $I_{oc.cp}$: $j_{oc.max} = (\pi I_{oc.cp})/S_{акт}$. Затем по зависимости $j_{пр}(U_{пр})$ (см. рис. 7) определяем $U_{oc.и} = f(j_{oc.max})$.

$$j_{oc.max} = (3,14 \cdot 250)/2,8 = 280 \text{ А/см}^2, \\ U_{oc.и} = f(280) = 2 \text{ В.}$$

2. Повторяющийся импульсный обратный ток и повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии:

$$I_{обр,п} = I_{зс.,п} = \frac{\pi q n_i W_o d_{вз}^2}{8 \tau_p^{n1} (1 - \beta_{n1})}, \quad (40)$$

где n_i и τ_p^{n1} соответствуют температуре 125 °С, $\tau_p^{n1} \sim T^{3/2}$, а W_o и β_{n1} – анодному напряжению равному $U_{зс.,п}$.

Толщина слоя объемного заряда $W_o = W_{он1} + W_{оп2}$, причем $W_{он1}$ и $W_{оп2}$ вычисляются по формулам (12), (15) – (17) при $U_{зс} = U_{зс.,п}$. Коэффициент переноса дырок через базу $n1$ также определяется при $U_{зс} = U_{зс.,п}$, используя формулы (12), (13), (26).

$$W_{он1} = 0,52 \cdot \sqrt{80 \cdot 1600} = 186 \text{ (мкм)};$$

$$E_M \approx \frac{2 \cdot 1600}{186 \cdot 10^{-4}} = 1,72 \cdot 10^5 \text{ (В/м)};$$

$$W_{оп2} = \frac{1}{1350} \ln \left(\frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1350 \cdot 1,72 \cdot 10^5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{13}} \right) = 24 \cdot 10^{-4} \text{ (см)} = \\ = 24 \text{ (мкм)};$$

$$W_o = 186 + 24 = 210 \text{ мкм};$$

$$W_{n1}^* = 290 - 186 = 104 \text{ (мкм)};$$

$$\beta_{n1} = \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{104}{98}\right)} = 0,75;$$

$$I_{\text{обр,п}} = I_{\text{зс.,п}} = \frac{3,14}{8} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{12} \cdot 210 \cdot 10^{-4} \cdot 2,4^2}{18 \cdot 10^{-6}(1-0,75)} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ (A)}.$$

3. Ударные токи в открытом состоянии. Из практики известно, что плотность ударного тока в открытом состоянии $j_{\text{ос.удар}}$ меняется от 1,5 кА/см² при $W_{\text{Si}} = 400$ мкм до 1 кА/см² при $W_{\text{Si}} = 800$ мкм. Находим $j_{\text{ос.удар}}$, соответствующее рассчитанной по формуле (10) толщине кремниевой пластины, а затем $I_{\text{ос.уд.}} = j_{\text{ос.уд.}} S_{\text{акт}}$.

$$W_{\text{Si}} = 490 \text{ мкм}, j_{\text{ос.удар}} = 1,4 \text{ кА/см}^2, I_{\text{ос.уд.}} = 1,4 \cdot 2,8 = 4 \text{ кА}.$$

4. Время включения приблизительно равно среднему геометрическому времени диффузии в n_1 (t_1) и p_2 (t_2) областях:

$$t = \sqrt{t_1 t_2}, \quad (41)$$

где $t_1 = \frac{(W_{n1}^*)^2}{2D_p}$ и $t_2 = \frac{(W_{p2}^*)^2}{2D_n}$ вычисляются при температуре 20 °С.

$$t_1 = \frac{(140 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 12} = 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$t_2 = \frac{(58 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 33} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$t = \sqrt{8,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

5. Время выключения. Расчет времени выключения проводится при максимально допустимой температуре структуры 125 °С по следующей формуле

$$t_{\text{вык}} = \tau_p^{n_1} \cdot \ln \frac{Q(t_1)}{Q_{\text{кр.}} - Q_{\text{нак.}} + Q_{j1}}, \quad (42)$$

где $Q(t_1)$ – избыточный заряд дырок в базе n_1 в момент времени t_1 ,

$$Q(t_1) = \frac{\beta_{p2} (\tau_p^{n_1})^2}{S_{\text{акт.}}} \left(-\frac{di_{\text{oc}}}{dt} \right)_{\text{сп}} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{I_{\text{oc.сп}}}{\tau_p} \left(-\frac{di_{\text{oc}}}{dt} \right)_{\text{сп}}^{-1} \right] \right\}; \quad (43)$$

$Q_{\text{кр.}}$ – критический заряд включения тиристора рассчитан ранее по (22);

$Q_{\text{нак.}}$ – избыточный заряд неравновесных носителей, накопленный в базах,

$$Q_{\text{нак}} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \varepsilon \varepsilon_0 q N_{n1} \tau_n} \cdot \left(\frac{dU_{3c}}{dt} \right) F \left(\sqrt{\frac{U_{3c}}{\tau_n} \left(\frac{dU_{3c}}{dt} \right)^{-1}} \right); \quad (44)$$

Q_{j1} – заряд обедненной области перехода j_1 при обратном напряжении, прикладываемом к тиристорному в процессе выключения,

$$Q_{j1} = \frac{q N_{n1} W_{\text{он}} (U_{\text{обр}})}{U_{\text{обр}}} \tau_p^{n_1} \left(\frac{dU_{3c}}{dt} \right)_{\text{кр}} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{U_{\text{обр}}}{\tau_p} \left(\frac{dU_{3c}}{dt} \right)_{\text{кр}}^{-1} \right] \right\}. \quad (45)$$

Скорость спада тока в открытом состоянии принимается для отечественных тиристоров $\left(-\frac{di_{oc}}{dt}\right)_{cn} = 5 \text{ А/мкс}$ в выражении (43). В формуле (44) для отечественных тиристоров $\left(\frac{dU_{zc}}{dt}\right) = 200 \text{ В/мкс}$. В формуле (45) $U_{обр}$ – обратное напряжение, прикладываемое к тиристоры в процессе выключения, для отечественных тиристоров $U_{обр} = 100 \text{ В}$. $W_{он}(U_{обр})$ и τ_p^{n1} в (47) вычисляются при $U_{zc} = U_{обр}$ по формулам (12), (8), (9).

$$Q(t_1) = \frac{0,79 \cdot (18 \cdot 10^{-6})^2}{2,8} \cdot 5 \cdot 10^6 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{250}{18 \cdot 10^{-6}} \cdot (5 \cdot 10^6)^{-1} \right] \right\} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2;$$

$$Q_{кр} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2;$$

$$Q_{нак} = \sqrt{\frac{3,14}{2} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,6 \cdot 10^{13} \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^6} \times \\ \times F \left(\sqrt{\frac{1072}{4,7 \cdot 10^{-6}} \cdot (200 \cdot 10^6)^{-1}} \right) = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2;$$

$$Q_{j1} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,6 \cdot 10^{13} \cdot 46,5 \cdot 10^{-4}}{100} \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10^6 \times \\ \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{100}{3,6 \cdot 10^{-6}} \cdot (1000 \cdot 10^6)^{-1} \right] \right\} = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2;$$

$$t_{вык} = 18 \cdot \ln \frac{4,3 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-7} - 1,2 \cdot 10^{-7} + 4,8 \cdot 10^{-8}} = 152 \text{ мкс.}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Тейлор П. Расчет и проектирование тиристорov [Текст] / П. Тейлор. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 208 с.

2 Евсеев Ю.А. Силовые полупроводниковые приборы [Текст]: учебник для техникумов / Ю.А. Евсеев, П.Г. Дерменжи. - М.: Энергоиздат, 1981. - 472 с.

3 Крутякова М.Г. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования [Текст]: учебник для техникумов / М.Г. Крутякова, Н.А. Чарыков, В.В. Юдин. - М.: Радио и связь, 1983.- 352 с.

4 Зи С. Физика полупроводниковых приборов [Текст]: в 2-х кн.: пер. с англ. / С. Зи. - М.: Мир, 1984.

5 Герлах В. Тиристоры [Текст] / В. Герлах. - М.: Энергоатомиздат, 1985. 328 с.

6 Замятин В.Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры [Текст]: справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов. - М.: Радио и связь, 1988. - 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П

Некоторые физические постоянные

Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} =$ $= 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$
Диэлектрическая проницаемость свободного пространства	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} =$ $= 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$
Диэлектрическая проницаемость кремния	$\epsilon = 12$
Заряд электрона	$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Коэффициент диффузии электронов при температуре 20 °С при температуре 125 °С	$D_n = 33 \text{ см}^2/$ $D_n = 22 \text{ см}^2/с$
Коэффициент диффузии дырок при температуре 20 °С при температуре 125 °С	$D_p = 12 \text{ см}^2/с$ $D_p = 8 \text{ см}^2/с$
Собственная концентрация носителей в кремнии при температуре 20 °С при температуре 125 °С	$n_i = 1,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ $n_i = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$
1 мкм = $1 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}$	

Оглавление

Введение.....	3
1. Основные разделы курсовой работы	3
2. Порядок выполнения курсовой работы и защиты	4
3. Расчет дискретного силового тиристора	5
3.1. Выбор исходного материала	7
3.2. Расчет параметров конструкции	10
3.3. Расчет диаметра тиристорного элемента и выбор конструкции корпуса	23
3.4. Расчет основных параметров тиристора	31
Библиографический список	36
Приложение. Некоторые физически постоянные	37

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТИРИСТОРА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для выполнения курсовых работ
по дисциплине «Физические основы электроники»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения

Редактор Аграновская Н.Н.

Составитель:
Свистова Тамара Витальевна

Подписано к изданию 30. 05.2019
Уч.-изд. л. 2,37.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14