

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»
ДЛЯ СОМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ОЧНОЙ И ЗАОЧНОЙ
ФОРМ ОБУЧЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ 0908 – ЭЛЕКТРОНИКА
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ:
7.090801 – МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ПРИБОРЫ;
7.090804 – ФИЗИЧЕСКАЯ И БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

СЕВАСТОПОЛЬ
2005

УДК 612.382

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Твердотельная электроника» для самостоятельной работы студентов очной и заочной форм обучения направления 0908 – «Электроника».

Специальности: 7.090801 – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы; 7.090804 – Физическая и биомедицинская электроника

/Составил Гусев В.А. – Севастополь: Издательство СевНТУ, 2003 г. – 24 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в изучении теоретического материала и выполнение курсовой работы по дисциплине «Твердотельная электроника», предусмотренной учебным планом.

Рецензенты: к.т.н., доцент Богач Николай Владимирович
д.т.н., профессор Бржезинский Владислав Адамович

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Электронной техники» факультета Радиоэлектроники СевНТУ (протокол №6 от 26 марта 2003 года).

Допущено учебно-методическим центром и научно-методическим советом СевНТУ в качестве методических указаний (протокол №_____ от «___»_____ 2003 г.)

ЗАДАНИЯ НА КУРСОВЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Обозначения величин:

R_{se} – удельное поверхностное сопротивление диффузионного слоя сильнолегированной базы;
 ρ_B – удельное сопротивление слаболегированной базы;
 ρ^+ – удельное сопротивление низкоомной подложки;
 τ_S – время жизни по механизму рекомбинации через ловушки (Шокли);
 τ_A – время жизни по механизму Оже;
 σ – скорость поверхностной генерации-рекомбинации;
 $N_E, N_B, N^{\pm}$ – концентрация примесей в эмиттере, базе и подложке;
 R, S – радиус и площадь р-п перехода;
 X_J – глубина залегания р-п перехода;
 $\delta(U)$ – толщина ОПЗ р-п перехода;
 $W_B, W_{эпи}, d$ – толщина базы, эпислоя и подложки;
 U_B, U_{BTh} – напряжение лавинного и теплового пробоя;
 q, μ, D, L – заряд, подвижность, коэффициент диффузии и диффузионная длина;
 C, Q, R_B – ёмкость, добротность и сопротивление базы диода;
 R_T – тепловое сопротивление диода;
 $t_{восст}$ – время восстановления обратного сопротивления;
 U_0 – контактный потенциал р-п перехода.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№/пара метры	Rse, Ом/о	ρ_B , Ом·см	τ_B , мкс	ρ^+ п, Ом·см	σ , см/с	Wэпи, мкм	Xj, мкм	d, мкм	R, см	RTO, К/мВт	Pmax, мВт
1,2	10	1	1	$3 \cdot 10^{-3}$	10	10	3	200	0,05	2	100
3,4	8	2	2	$5 \cdot 10^{-3}$	15	12	4	300	0,04	2	200
5,6	15	3	5	$5 \cdot 10^{-3}$	20	15	3	300	0,03	1	200
7,8	20	5	3	$3 \cdot 10^{-3}$	10	10	2	200	0,02	2	200
9,10	10	2	1	$5 \cdot 10^{-3}$	20	12	4	300	0,01	2	100
11,12	8	5	1	$5 \cdot 10^{-3}$	20	8	2	200	0,06	0,5	300
13,14	10	1	2	$3 \cdot 10^{-3}$	10	10	3	300	0,07	1	200
15,16	12	2	3	$5 \cdot 10^{-3}$	20	12	4	200	0,08	2	100
17,18	15	3	4	$3 \cdot 10^{-3}$	10	10	3	300	0,02	1	200
19,20	20	4	5	$5 \cdot 10^{-3}$	20	8	2	200	0,03	0,5	300
21,22	25	5	6	10^{-2}	10	10	3	300	0,04	1	100
23,24	30	1	7	$3 \cdot 10^{-3}$	20	8	4	200	0,05	2	200
25,26	40	2	8	$5 \cdot 10^{-3}$	10	10	3	300	0,06	1	200
$\tau_{SE} = 10^{-7}$ с; $\rho_{SK} = 10^{-3}$ Ом·см ² ; $S_{KP} = 10^{-2}$ мм ²											

P^+ - П-П⁺ - четный вариант

П⁺ - P-P⁺ - нечетный вариант

Содержание

Задание. Режимы измерения. Режимы переходных процессов.
Температурный диапазон

1. Технологические основы изготовления диода

1.1 Изготовление подложки

1.2 Эпитаксия

1.3 Окисление

1.4 Литография

1.5 Травление

1.6 Диффузия

1.7 Металлизация

1.8 Скрайбирование

2. Расчет параметров диода

2.1 Расчет конструктивных параметров диода

2.2 Расчет концентрационного профиля и подвижности
носителей заряда

2.3 Расчет обратных токов

2.4 Температурная зависимость обратного тока

2.5 Напряжение пробоя

2.5.1 Тепловой пробой

2.5.2 Лавинный пробой

2.6 Расчет прямого падения напряжения

2.7 Температурная зависимость прямого падения напряжения

2.8 Расчет вольт–фарадной характеристики

2.9 Зависимость добротности от частоты

2.10 Расчет импульсных характеристик

3. Теоретический расчет

3.1 Исходные данные

3.2 Физические константы

ЗАДАНИЕ

1. Расчет параметров диода.
2. Расчет температурной зависимости $I_{обр}(T), U_{np}(T)$,
3. Расчет температурной зависимости $U_B^{нов}(T), U_B^{th}(T)$.
4. Расчет вольт - фарадной характеристики $C(U)$.
5. Расчет частотной зависимости добротности (при $U_{обр} = 1B$).
6. Расчет температурной зависимости $Q_{нч}(T), Q_{вч}(T)$.
7. Расчет зависимости $\omega_{max}(T), Q_{max}(T)$.
8. Расчет зависимости $t_{восст} = f(I_{np}), t_{восст} = f(U_{обр})$.

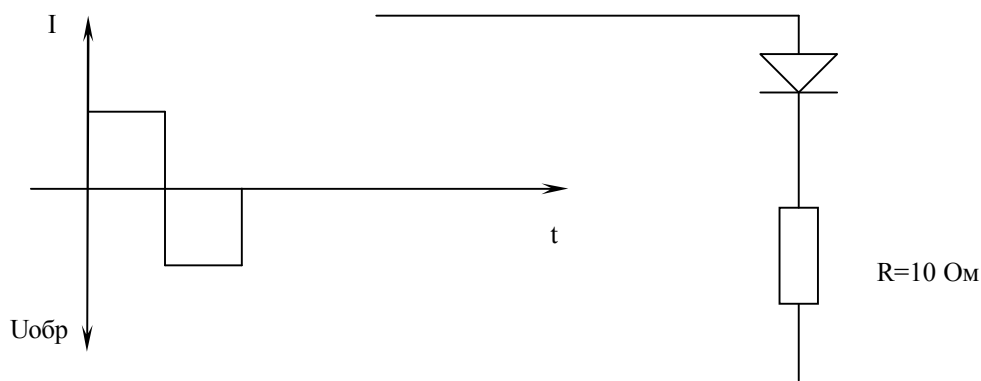
РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

$$T = 300K \quad I_{np} = 0,1I_{max} \quad U_{обр} = 0,5U_B \quad C(U) : 0 \div 0,8U_B$$

РЕЖИМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

$$I_{np} = 10^{-1}I_{max} \div I_{max} \quad \text{при} \quad U_{обр} = 0,5U_B$$

$$U_{обр} = 1B \div 0,9U_B \quad \text{при} \quad I_{np} = 0,1I_{max}$$



ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН

$$-60^{\circ}C \leq T \leq 120^{\circ}C$$

Материал Si (кремний)

Вариант структуры p^+-n-n^+

Вариант №10

$R_{se}, \text{Ом}/\square$	10
$\rho_B, \text{Ом}\cdot\text{см}$	2
$\tau_B, \text{мкс}$	1
$\rho_p^+, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$\sigma, \text{см/с}$	20
$W_{эпи}, \text{мкм}$	12
$X_j, \text{мкм}$	4
$d, \text{мкм}$	300
$R, \text{см}$	0.01
$R_{TO}, \text{К/мВт}$	2
$P_{max}, \text{мВт}$	100
$\tau_{se}, \text{мкс}$	10^{-7}
$\rho_{sk}, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	10^{-4}

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДА

Планарный процесс в настоящее время занимает ведущее место в полупроводниковой технологии. Это связано с тем, что при планарном процессе обеспечивается массовое производство приборов с высокими электрическими параметрами и надежностью при минимальных экономических затратах. В планарном процессе наиболее полно отражается все многообразие технологических приемов и методов, общих в производстве полупроводниковых приборов и ИМС различного типа. Современная планарная технология представляет собой последовательность следующих этапов:

1. Нарастивание на поверхности кремниевой подложки эпитаксиального слоя.
2. Окисление поверхности кремния.
3. Фотолитография.
4. Диффузия или ионная имплантация примесей.
5. Осаждение тонких металлических пленок контактного слоя.
6. Скрайбирование.

1.1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОДЛОЖКИ

Для изготовления большинства дискретных полупроводниковых в качестве исходных заготовок используют дисковые срезы монокристаллических слитков (пластины) или вырезанные из них детали квадратной формы, называемые кристаллами.

Главной задачей механической обработки в производстве полупроводниковых приборов является получение заготовок необходимых размеров, формы и профиля с требуемым качеством поверхности. Эта задача решается путем разрезания слитков на пластины, шлифования и полирования пластин, профилирования их поверхности различными механическими, механохимическими или физическими методами.

Для изготовления полупроводниковых диодов применяют монокристаллический сверхчистый кремний, получаемый методом Чохральского. Полупроводниковые монокристаллические слитки имеют вид цилиндров диаметром до 100 мм и более.

Разделение полупроводниковых слитков на пластины выполняют резанием абразивным инструментом. Исходным сырьем для получения такого инструмента служат природные или искусственные абразивные материалы, используемые в виде порошков. К природным абразивам относятся алмаз, корунд, к искусственным – электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, синтетические алмазы. Применяться абразивные порошки могут в связанном или свободном состоянии. В первом случае абразивные материалы наносятся тонким слоем на металлическую основу инструмента. Для прочного закрепления абразивного (чаще всего, алмазного) слоя основой служит металлическая, керамическая, пластмассовая связка. Нанесение

связи, содержащей абразивный порошок, выполняют путем спекания под давлением или гальваническим путем. Так изготавливают отрезные диски с наружной или с внутренней режущей алмазной кромкой. В свободном состоянии абразивные порошки применяются в виде суспензий – механических взвесей порошков в воде, масле или других жидкостях. Во время резания суспензия подается в зону соприкосновения движущегося инструмента (диска, полотна, проволоки) и обрабатываемого материала. Резка в этом случае происходит в результате разрушения полупроводника микрочастицами абразивного порошка, а инструмент служит средством доставки этих частиц в зону резания.

Слитки могут разрезаться в поперечном или продольном (что значительно реже) направлении. Во всех случаях процесс разделения складывается из последовательного выполнения операций:

- 1) Ориентация монокристаллического материала;
- 2) Закрепление слитка в ориентированном положении на оправке;
- 3) Резание слитка на пластины по принятому способу раскроя.

В технологии полупроводниковых приборов применяют несколько методов разрезания слитков на пластины:

- резание дисками с алмазосодержащей наружной или внутренней кромкой:
- резание стальными полотнами или проволокой с абразивной суспензией:
- скрайбирование:
- электрофизические способы (ультразвуковая обработка с абразивами, электроэрозионная обработка, лучевые способы обработки с использованием электронного или лазерного луча).

Резание слитков на пластины с использованием алмазосодержащих дисков наиболее распространено. Алмазосодержащий диск представляет собой тонкий стальной или томпаковый диск, наружная или внутренняя кромка которого насыщена алмазной крошкой со средним размером зерна 20-40 мкм. Диски с наружной режущей кромкой имеют диаметр не более 50 мм при толщине 0.1-0.2 мм. Такие диски применяют для разрезания слитков небольшого диаметра или для разрезания пластины на кристаллы. При применении дисков с наружной режущей кромкой большого диаметра возникают биения, что увеличивает ширину реза и снижает точность обработки.

Алмазосодержащие диски с внутренней режущей кромкой имеют диаметр отверстия 50-60 мм и наружный диаметр 100-150 мм. Эти диски закрепляют на шпинделе станка с большим натягом, что практически исключает биения и позволяет разрезать слитки диаметром 30-60 мм. Резание производят на больших оборотах (8000-12000 об/мин). При таких угловых скоростях вращения диска линейная скорость резания может достигать 20 м/с. Для охлаждения места реза используют проточную воду или специальные эмульсии сложного состава, выполняющие одновременно функции антифрикционной жидкости и облегчающие сбор отходов



полупроводникового материала в отстойниках станков. Резание слитков на пластины алмазосодержащими дисками с внутренней режущей кромкой обеспечивает максимальную производительность, сокращение отходов материала (по сравнению с резанием дисками с наружной алмазной кромкой), сравнительно высокую чистоту и точность обработки. К *недостаткам* метода следует отнести большую толщину механически нарушенного слоя, обусловленную интенсивным динамическим воздействием алмазных зерен на поверхность пластины в процессе резания; сложность установки инструмента и наладки оборудования; зависимость чистоты и точности обработки от качества изготовления и стойкости инструмента.

После разрезания слитков пластины полупроводниковых материалов подвергают шлифованию и полированию. Необходимость шлифования объясняется тем, что после резки кристаллы имеют неточности формы и размеров:

- 1) неплоскостность поверхностей в связи с наличием выбоин, царапин, сколов;
- 2) непараллельность основных рабочих поверхностей;
- 3) неточность размеров толщины кристаллов.

Помимо этого шлифование и полирование позволяют удалять нарушенный в процессе резания приповерхностный слой, в котором кристаллическая структура разрушена полностью либо имеется большая плотность дефектов кристаллической структуры типа дислокаций.

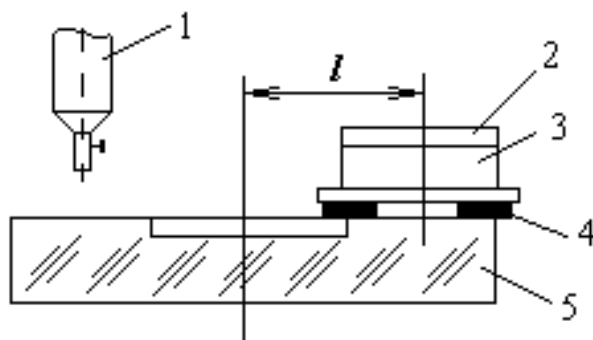
Качество шлифования и полирования поверхностей пластин и кристаллов оказывает существенное влияние на выполнение всех последующих технологических операций в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Электрофизическое состояние поверхностных свойств будущего полупроводникового прибора полностью закладывается на стадии шлифования и полирования пластин и кристаллов.

Шлифование – это обработка пластин на твердых шлифовальных дисках, выполненных из чугуна, стекла или латуни, абразивными микропорошками с крупностью зерна от 28 до 3 км или алмазными шлифовальными кругами зернистостью от 120 до 5 мкм.

Наиболее распространенным видом шлифования является одностороннее шлифование свободным абразивом с наклейкой пластин на оправку. Пластины полупроводника, укрепленные с помощью специального клея на оправках, находятся в контакте с поверхностью шлифовального круга, на которую непрерывно подается абразивная суспензия из дозатора. При вращении круга оправки с пластинами также вращаются вокруг своих осей в направляющих роликах и пластины описывают сложные траектории по поверхности шлифовального круга. Чем сложнее траектория движения пластин, тем однороднее шлифование. Для регулирования давления на пластины в процессе обработки применяют калиброванные грузы.

Механизм шлифования свободным абразивом заключается в следующем. При перемещении шлифовального круга относительно пластины

наиболее крупные зерна абразива ударяют по ее поверхности, создавая конические трещины. Вначале в процессе участвует 7-10% массы зерен, остальные зерна неподвижны. Постепенно все зерна вовлекаются в работу, перемещаясь и переворачиваясь в пространстве между кругом и пластиной. За счет вращения зерен разных размеров действие шлифовального круга имеет ударно-вибрационный характер.



- 1 - дозатор абразивной суспензии
 2 - калиброванный груз
 3 - оправка
 4 - пластина полупроводника
 5 - шлифовальный круг

Рисунок 1 – Схема одностороннего шлифования свободным абразивом

Шлифование происходит в основном вследствие образования ударных трещин. При пересечении конических ударных трещин образуются выколки, которые отрываются от поверхности пластины и удаляются вместе с отработанной абразивной суспензией. Роль жидкости (чаще всего воды) в которых сводится к распределению зерен по поверхности шлифовального круга и удалению разрушенных зерен и частиц полупроводника; к снижению трения и отведению теплоты; к смягчению ударно-вибрационных усилий; к гидратации или окислению поверхности полупроводника (что наиболее важно для процесса полирования); к ускорению процесса удаления материала за счет расклинивающего действия в микротрещинах (жидкость в тонких слоях ~0.1 мкм ведет себя подобно упругому твердому телу).

Качество шлифования в значительной степени определяется качеством приготовления абразивной суспензии. Для этой цели обычно используют микропорошки электрокорунда белого (ЭБ) и карбида кремния зеленого (КЗ) с зернистостью от 3 до 20 мкм.. Гранулометрический состав, характеризующийся однородностью размеров абразивных зерен, улучшают дополнительным отмучиванием микропорошков. Отмучивание основано на разной скорости оседания зерен микропорошка различных размеров (крупной, мелкой и предельной фракций), взвешенных в суспензии. Для приготовления суспензии для шлифования используют только отмученные микропорошки, поскольку присутствие в ней зерен крупной и предельной фракций приводит к образованию на поверхности пластин и кристаллов рисок и выколок разной глубины. Оптимальной концентрацией микропорошков в шлифовальной суспензии является концентрация в пределах 20-33% микропорошка в жидкости. Чистота обработки поверхности

пластин и кристаллов при шлифовке зависит от величины зерен используемого абразивного микропорошка.

Полирование пластин производят на мягких подложках из фетра или батиста, пропитанных абразивными пастами на жировой основе с крупностью зерен абразива от 3 до 0.25 мкм. При полировании полупроводниковых пластин используют алмазные порошки и пасты, пасты на основе кубического нитрида бора (эльбора), оксида алюминия, оксидов церия, циркония, хрома, кремния. Применение алмаза для полирования не всегда дает наилучшие результаты, так как в этом случае на поверхности пластин обычно остается сеть микроскопических рисок – алмазного фона. Использование более мягких абразивов, таких, как оксиды хрома, циркония или кремния, при некотором снижении производительности процесса обеспечивает более высокий класс чистоты поверхности.

Основу алмазных паст составляют алмазные микропорошки в смеси с высокомолекулярными поверхностно-активными веществами. Пасты имеют различную концентрацию алмазного микропорошка: высокую (В), среднюю (С), низкую (Н), пониженную (П); они могут быть различной консистенции: твердые (Т), густые (Г), мазеобразные (М), жидкие (Ж). Перед нанесением пасты полировальник смачивают спиртом для улучшения равномерности распределения зерен алмазного микропорошка. Полировальную алмазную суспензию составляют, как правило, на основе синтетических алмазных порошков и технического масла и наносят на полировальник методом втирания, так же как полировочную пасту. Необходимо иметь в виду, что поскольку алмазные зерна в процессе полирования работают в закреплённом состоянии (в материале полировальника), то процесс происходит с большим тепловыделением. Это обстоятельство не позволяет использовать интенсивные режимы полирования, поскольку разогрев жидкой компоненты абразивной среды может привести к размягчению наклеечных материалов и отрыву пластин с крепежных блоков. Как правило, процесс полировки начинают выполнять на алмазных микропорошках с крупными зёрнами (3 мкм), а затем, сменив полировальник и абразивную среду, переходят к полированию на микропорошках с мелкими зёрнами (1 мкм). Окончательную, самую тонкую стадию процесса ведут в абразивной среде на основе окиси хрома с добавлением порошка горчицы. Этот процесс очень малопродуктивен. Более производительными являются химико-механические процессы полировки с применением двуокиси циркония и двуокиси кремния. В этом случае в состав полировальной суспензии входят растворы КОН и NaOH, которые окисляют поверхность кремния, растворяют образовавшиеся окислы и тем самым понижают твердость поверхностного слоя, что способствует более производительному его удалению зёрнами абразива. В некоторых случаях для окончательной химико-механической полировки используют составы, не содержащие абразивных порошков. Эти составы содержат кислую медь, фтористый аммоний и азотную кислоту.

Для последующих операций важна чистота поверхности. Поэтому перед началом, а также неоднократно в течение технологического цикла

производят очистку, удаляя посторонние вещества с помощью промывки, растворения и т.п. Операция отмывки состоит из двух этапов: обезжиривание подложек в органических растворителях и промывка в особо чистой воде.

Обезжиривание подложек проводят для удаления органических физических загрязнений. Для удаления неполярных органических загрязнений используют такие растворители, как толуол, четыреххлористый углерод, фреоны, а для удаления полярных органических загрязнений используют ацетон, спирты и трихлорэтилен.

Процесс обезжиривания в органических растворителях в сильной степени зависит от режима его проведения (температуры, длительности и скорости смены отработанного растворителя). Так, с повышением температуры процесса скорость растворения органических загрязнений возрастает. На качество обезжиривания оказывает влияние время проведения процесса, которое необходимо для полного растворения определенного вида загрязнения в растворителе. По мере прохождения процесса обезжиривания подложек сам растворитель постепенно загрязняется за счет перехода в него продуктов растворяемого вещества, что приводит к снижению эффективности процесса растворения и в конечном счете к некачественному обезжириванию подложек. Поэтому своевременное и быстрое удаление загрязненного растворителя очень важно для качественного обезжиривания. Для интенсификации процесса обезжиривания и улучшения качества отмывки широко используют ультразвуковые ванны.

Технологический процесс обезжиривания включает в себя загрузку полупроводниковых подложек во фторопластовые кассеты, которые последовательно опускаются в несколько ванн (от 2 до 4) с растворителем или смесью растворителей. В первой ванне происходит удаление наиболее грубых жировых загрязнений, во второй ванне снимаются оставшиеся не растворенными при первой обработке участки жировых покрытий, а в последующих ваннах происходит окончательная более тщательная отмывка подложек. В процессе обезжиривания происходит взаимодействие растворителя с различными видами загрязнений и в результате десорбции молекулы этих загрязнений переходят с поверхности полупроводниковой подложки в приповерхностный слой растворителя (жидкости или пара), а молекулы растворителя оседают на поверхности подложки. Происходит как бы замещение адсорбированных молекул загрязнений молекулами растворителя. Процесс замещения зависит от многих физических факторов, например, от энергии связи молекулы загрязняющего вещества с поверхностью полупроводниковой подложки или с растворителем. Таким образом, в процессе обезжиривания на поверхности полупроводниковой подложки создаются слои растворителя, которые необходимо удалить. Поэтому вторым этапом в процессе отмывки подложек после их обезжиривания является процесс промывки их в особо чистой воде. Процесс промывки в особо чистой воде служит для удаления с поверхности подложек остатков растворителя и частиц продуктов растворения. В зависимости от

требований последующих технологических процессов промывку полупроводниковых подложек проводят в деионизованной воде.

Существуют разные методы очистки поверхности пластин: погружение в реактив, промывка в протоке реактива, кипячение, обработка в парах, в распыленном реактиве, полив реактивом с одновременным центрифугированием пластины, промывка с применением ультразвука (УЗ), ионно-плазменная обработка и т.д. Выбор метода зависит от типа загрязнений. Технологическая последовательность операций при очистке пластин Si в планарной технологии для одного из процессов выглядит следующим образом:

- после механической обработки производится

1. Многократное кипячение в органических растворителях (на последнем этапе применяют растворитель марки ОСЧ)
2. Кипячение в азотной кислоте
3. УЗ-обработка (дважды) в смеси серной кислоты с ацетоном
4. Промывка в протоке деионизованной воды
5. Сушка на центрифуге или под струей очищенного воздуха

- перед эпитаксией и первым окислением

1. Отжиг в водороде (1280°C , 5-15 мин)
2. Газовое травление в смеси $\text{H}_2 + 5\% \text{HCl}$ (1280°C , 10 мин)

- перед диффузией и вакуумным напылением

1. Обработка в органических растворителях марки ОСЧ
2. Кипячение в азотной кислоте
3. Промывка водой с применением кистей
4. УЗ-обработка в смеси ацетона, серной кислоты и воды
5. Промывка в деионизованной воде
6. Сушка на центрифуге.

1.2 ЭПИТАКСИЯ

Это процесс наращивания на пластину (подложку) монокристаллического слоя (эпитаксиальной пленки), повторяющего структуру подложки и ее кристаллографическую ориентацию.

Эпитаксиальная пленка создается на всей поверхности подложки, одновременно в нее вводятся примеси, распределяющиеся равномерно по всему объему пленки.

В настоящее время, за небольшим исключением, приборы создают на базе автоэпитаксиальных слоев кремния. Автоэпитаксия – это процесс ориентированного нарастания вещества, однотипного по структуре с подложкой, отличающегося от нее только содержанием легирующих примесей.

Существует три основных технологических метода эпитаксии, отличающихся природой физико-химических явлений образования растущего слоя:



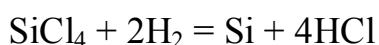
1. Молекулярно-лучевая эпитаксия из молекулярных пучков в вакууме;
2. Газофазная эпитаксия с помощью химического взаимодействия в газовой или парогазовой смеси, называемая газовой или химической эпитаксией;
3. Жидкофазная эпитаксия в жидкой фазе путем рекристаллизации из расплава или раствора-расплава;

Для кремния наибольшее распространение получили процессы в газовой фазе, которые позволяют выращивать однородные слои кремния большой площади с концентрацией примесей, изменяющейся в широких пределах. Среди наиболее распространенных методов наращивания эпитаксиальных слоев кремния основными являются восстановление его тетрахлоридов водородом.

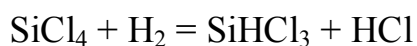
Типичный процесс эпитаксиального наращивания состоит из следующих операций:

1. Загрузка пластин в реактор;
2. Продувка реактора инертным газом и водородом;
3. Нагрев пластин и подача реагентов для газового травления с целью очистки пластин;
4. Прекращение травления и установление температуры, необходимой для наращивания;
5. подача реагентов для осаждения и легирования эпитаксиальных слоев;
6. Прекращение подачи реагентов и кратковременная продувка водородом;
7. Выключение нагрева, продувка водородом и инертным газом: ArS;
8. Разгрузка реактора.

Широкое распространение хлоридного метода эпитаксии кремния обусловлено сравнительной простотой и доступностью исходных материалов. Процесс осуществляется в горизонтальных или (чаще) вертикальных реакторах в проточной системе. Парогазовая смесь образуется при пропускании водорода через испаритель с тетрахлоридом кремния, термостатированный при температуре, обеспечивающей необходимое парциальное давление пара тетрахлорида кремния в смеси. Механизм взаимодействия тетрахлорида кремния с водородом, который в общем случае можно записать:



Реально следует представить в виде нескольких стадий:



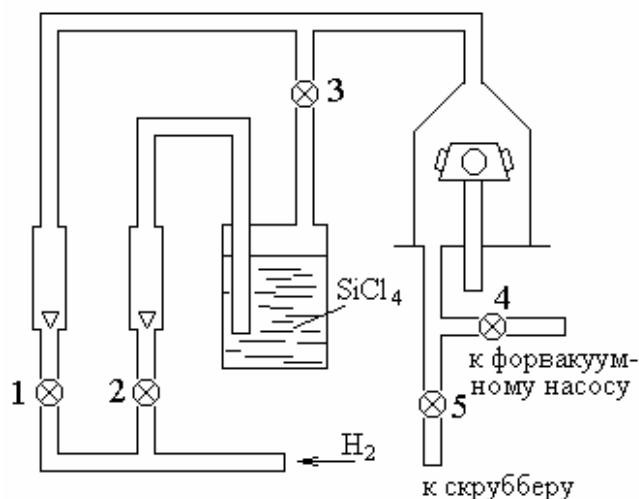
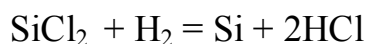


Рисунок 2 – Схема установки для эпитаксии кремния

Осаждение кремния совершается в интервале температур 1150-1250 °С, концентрация тетрахлорида в водороде поддерживается на уровне 0,5-1%, а скорость потока газа составляет 0,1-1 м/с. При этих условиях скорость слоев близка к 1 мкм/мин. При невысоких температурах и большом содержании тетрахлорида в парах образуются рыхлые и аморфные или поликристаллические слои кремния. Увеличение температуры подложек и уменьшение мольной доли тетрахлорида в газовой смеси ведет к уплотнению и кристаллизации слоев.

Легирование эпитаксиальных слоев кремния в хлоридном процессе целесообразно проводить из галоидных соединений легирующих примесей. Для легирования можно использовать независимые внешние источники с введением в поток газа-носителя пара лигатуры или смеси лигатуры с тетрахлоридом кремния.

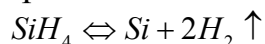
Для легирования бором и фосфором можно применять их соединения $\text{BBr}_3(\text{BCl}_3)$ и PCl_3 . Преимущество этих лигатур состоит в том, что для них упругость пара тетрахлорида кремния. Это упрощает расчет уровня легирования и его контроль в процессе эпитаксиального роста. Ограничением в их применении для легирования кремния является то, что эти соединения имеют коэффициент превращения, близкий к единице (концентрация примеси в растущем слое практически равна ее концентрации в растворе). Трудности, возникающие при контроле легирования с низкими уровнями концентрации примеси, таким образом, не позволяют воспроизводимо получать высокоомные слои. Поэтому для получения высокоомных слоев лучше использовать растворы треххлористой сурьмы SbCl_3 , для которой коэффициент превращения намного меньше. Необходимо

также учитывать то, что давление пара лигатуры при одной и той же температуре ниже давления пара SiCl_4 . Это обуславливает относительное обогащение раствора лигатурой по мере испарения источника и приводит к повышению концентрации примеси в слое по мере его роста.

Гидриды примесей переносятся в зону роста и через промежуточную стадию гетерогенной химической реакции захватываются растущим эпитаксиальным слоем. Минимальное и максимальное значение уровня легирования зависят от конструкции разрядной камеры.

Недостатком рассмотренного метода является сильное влияние температуры на концентрацию вводимой примеси, что при плохой стабилизации температуры вызывает появление неоднородности в распределении удельного сопротивления по эпитаксиальному слою. Однородность слоя можно повысить, если использовать газовое легирование, вводя в газ-носитель газообразные примеси в расчетной концентрации или использовать гидридный метод эпитаксии (силановый метод), который состоит в пиролизе моносилана.

Уравнение реакции термораспада моносилана имеет вид:



Освобождающийся кремний осаждается на подложках, температура которых может быть снижена до 1000°C . Это практически предотвращает диффузию примесей из подложки и способствует росту слоя с равномерным распределением легирующей примеси по толщине.

Определенной сложностью при работе с моносиланом является возможность его самопроизвольного газофазного разложения в реакторе с образованием твердых частиц. Это вызывает уменьшение концентрации моносилана в газовой фазе и снижение скорости роста.

Кроме сравнительно низкой температуры процесса преимуществом метода пиролиза моносилана является отсутствие во время роста слоев соединений, содержащих хлор. При этом по сравнению с хлоридным методом удастся уменьшить автолегирование и получить более резкие профили распределения концентрации примесей на границе слой-подложка.

При получении эпитаксиальных слоев кремния наряду с целенаправленным легированием следует учитывать влияние процесса автолегирования примесями, содержащимися в подложке. Механизмы этого процесса могут быть различны:

1. Диффузия в твердой фазе из подложки в растущий слой по следующему закону:

$$N(x) = \frac{Nn^+}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_\Sigma \cdot t_\Sigma}}, \quad \text{где}$$

D_Σ - коэффициент диффузии примеси подложки,

t_Σ - суммарное время обработки.

2. Непосредственный перенос примеси через газовую фазу;

3. Перенос примеси в связанном виде при химическом взаимодействии компонентов парогазовой смеси с подложкой (при образовании летучих хлоридов примесного элемента).

Наиболее существенным при высоких температурах является механизм диффузии в твердой фазе.

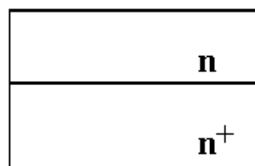


Рисунок 3 - Пластина кремния с эпитаксиальным слоем

1.3 ОКИСЛЕНИЕ

С целью защиты кремния при диффузии и пассивации поверхности кремниевых полупроводниковых приборов применяются пленки SiO_2 , имеющие аморфную структуру. Аморфная структура SiO_2 отличается от кристаллического кварца разупорядоченным строением решетки и меньшей плотностью. Атомы В, Р, Al имеют малый коэффициент диффузии в пленке SiO_2 и практически не проникают сквозь нее.

При окислении Si в парах воды образуются влагосодержащие пленки окиси кремния, а вода при этом входит в кристаллическую структуру в виде групп $-\text{OH}$ в том большем количестве, чем больше в SiO_2 примесей щелочных металлов. В процессе диффузии газы H_2 , Ar, O_2 и др. адсорбируются на поверхности SiO_2 или растворяются в ней, а затем диффундируют сквозь эту пленку.

Методы окисления поверхности кремния можно подразделить на:

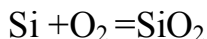
1. термическое окисление, в том числе под давлением
2. анодное окисление в растворах электролитов
3. окисление в кислородной плазме

Высокотемпературное окисление в сухом кислороде является наиболее распространенным методом окисления кремния, так как обеспечивает получение пленок SiO_2 с высокой маскирующей способностью и низкой плотностью связанного заряда на границе раздела: кремний – оксид. Температура в процессе окисления при атмосферном давлении обычно находится в пределах $850-1200^\circ\text{C}$. Окисление идет и при более низкой температуре, но скорость роста оксида в этом случае очень мала. Повышение давления кислорода позволяет ускорить процесс окисления в области низких температур.

Установка для окисления состоит из печи сопротивления, применяемой для проведения процесса диффузии примеси. Температура в рабочей зоне печи может изменяться в интервале $900-1200^\circ\text{C}$. В рабочий канал печи помещают реактор, выполненный из оптического плавленого кварца. Реактор обычно снабжен шлифом для отделения реакционного объема от внешней среды после загрузки пластин на держатель. Со стороны входа реактор соединен с системой подачи кислорода, в которую входят: источник

кислорода (обычно сосуд Дьюара с жидким кислородом, снабженный испарителем), осушитель и фильтр. В подающую магистраль включены вентили-накатели для регулирования расхода кислорода и ротаметр для измерения его расхода.

Образование пленки оксида при термическом окислении кремния в кислороде описывается реакцией:



Процесс перехода кремния в оксид определяет как его структуру, так и структуру переходной области Si-SiO₂. Химическое взаимодействие кремния с кислородом возможно на поверхности раздела оксид-кремний (когда коэффициент диффузии кислорода в оксиде больше, чем коэффициент диффузии кремния в нем).

Скорость роста оксида в зависимости от температуры и толщины пленки может контролироваться различными стадиями процесса. При низких температурах скорость окисления в основном определяется кинетикой химической реакции на границе раздела кремний-оксид. При высоких температурах вступает в силу ограничение, связанное со скоростью диффузии окислителя через слой оксида.

На ранних стадиях процесса в оксиде диффундируют атомы или атомарные ионы кислорода. При увеличении толщины растущей пленки механизм транспорта изменяется и в оксид диффундируют молекулы или молекулярные ионы кислорода. Одной из причин изменения состояния окисляющего агента может явиться действие электрического поля, создаваемого диффундирующими частицами. По мере увеличения толщины пленки влияние поля уменьшается и процесс может полностью определяться движением молекул или молекулярных ионов, энергия образования которых меньше, чем атомарных ионов.

Физические процессы, происходящие на поверхности раздела кремний-оксид и в объеме оксида, следовательно, скорость окисления зависит от содержания примесей в исходном кремнии. По мере окисления на поверхности устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся поверхностной концентрацией примеси в кремнии, суммарной концентрации примеси в оксиде и коэффициентом преобразования примеси:

$$M = N_{\text{Si}}/N_{\text{SiO}_2}$$

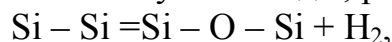
Если коэффициент преобразования примеси $m \gg 1$ (для Р), то примесь в основном ускоряет химическую реакцию на поверхности раздела и кинетика роста оксида подчиняются параболическому закону. Это наиболее ярко проявляется при низких температурах окисления.

Если $m < 1$ (для В), то примесь отесняется из кремния в оксид.

Чаще всего используют комбинированное окисление кремниевых пластин.

Окисление кремния в водяном паре происходит по следующему механизму. После образования первых слоев оксида, препятствующих непосредственному контакту пара воды с поверхностью кремния, остается

две возможности развития процесса окисления: либо взаимодействие атомов кремния в поверхностном слое с молекулами воды, растворенными в оксиде:



либо взаимодействие поверхностного оксида с промежуточной группой гидрооксида кремния $\text{Si} - \text{OH}$, называемого силанолом. Водород, который образуется и в том, и в другом случае, быстро диффундирует от поверхности раздела через оксид во внешнюю среду (частично он может восстанавливать оксид до состояния силанола). Скорость диффузии водорода при температуре окисления примерно на 4 порядка выше, чем скорость диффузии «воды» в оксиде. Ввиду этого процесс окисления в основном ограничивается концентрацией «воды» (силаноловых групп) у поверхности раздела, то есть протекает при диффузионном ограничении, что подтверждается параболической зависимостью толщины растущего слоя оксида от времени. Такое течение процесса характерно для высоких температур, превышающих 1100°C . При более низких температурах закон окисления становится линейно-параболическим, а при дальнейшем снижении температуры – линейным, что связано с переходом в кинетическую область, где скорость окисления ограничивается скоростью поверхностной реакции.

Установка для окисления в потоке водяного пара за исключением входной магистрали подобна установке для окисления в сухом кислороде. Водяной пар создается при кипении деионизованной воды в колбе, температура которой автоматически стабилизируется на уровне 102°C . Это обеспечивает поддержание давления пара в реакторе на уровне атмосферного в течение всего процесса окисления. Вместо осушителя во входную газовую магистраль включают барботер с водой, помещенный в термостат. Изменяя температуру барботера, можно в широких пределах изменять парциальное давление водяного пара, переходя от условий, близких к условиям окисления в сухом кислороде, к условиям, близким к окислению в потоке водяного пара при атмосферном давлении. Если барботер находится при температуре ниже 16°C с одновременной заменой кислорода на инертный газ, то можно снизить скорость окисления до значений меньших, чем при окислении в сухом кислороде. Кислородные ионы и силаноловые группы в процессе окисления во влажном кислороде диффундируют через оксид и взаимодействуют с поверхностью кремния независимо друг от друга. Процесс окисления во влажном кислороде подчиняется линейно-параболическому закону.

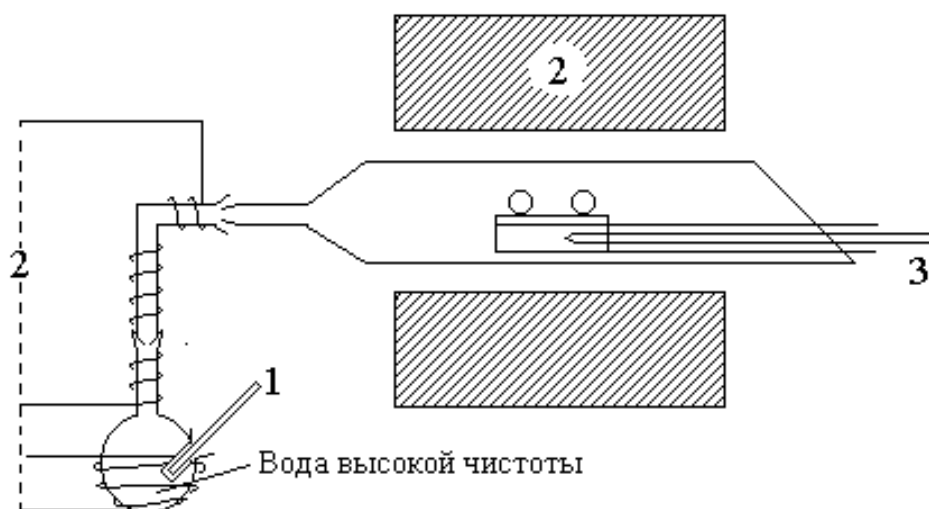


Рисунок 4 – Схема установки для окисления кремния в потоке водяного пара (1- термометр, 2 – печи сопротивления, 3 – термопара)

Маскирующие свойства пленок SiO_2 , выращенных в водяном паре, ниже по сравнению со свойствами оксида, полученного в сухом кислороде, а плотность связанного заряда на поверхности раздела выше, что обусловлено насыщенностью оксида «растворенной водой».

При комбинированном окислении первый этап – высокотемпературное окисление в сухом кислороде – обеспечивает маскирование для процессов фотолитографии.

Второй этап – окисление кремния в водяном паре – обеспечивает необходимую толщину пленки SiO_2 за сравнительно малое время.

Третий этап – высокотемпературное окисление в сухом кислороде – обеспечивает стабильность границы раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

Слой диоксида кремния получил широкое распространение, так как обладает следующими свойствами:

1. Функция защиты – пассивация поверхности.
2. Функция маски, через окна которой вводится необходимая примесь.
3. Высокие диэлектрические характеристики.
4. Равномерность толщины.
5. Прочность.
6. Достаточная чистота.
7. Одинаковый с кремнием температурный коэффициент линейного расширения.

Применение планарной технологии на кремнии дает возможность сочетать термическое окисление с процессом перераспределения примеси (вторая стадия диффузии), поскольку оба эти процесса могут осуществляться при одной и той же температуре, выбранной с учетом требований к диффузионным слоям.

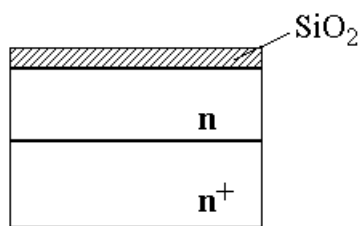


Рисунок 5 - Пластина кремния с окисной пленкой и эпитаксиальным слоем

1.4 ФОТОЛИТОГРИФИЯ

В полупроводниковой технологии для интенсификации химического и электрохимического травления, при отжиге радиационных эффектов лазерным излучением и в ряде случаев используют фотохимические процессы. Основным местом их использования является фотолитография – это процесс формирования на поверхности пластины с помощью светочувствительного химически стойкого материала отверстий в масках, создаваемых на поверхности пластины для локального легирования, травления, окисления, напыления.

Она основывается на использовании светочувствительных полимерных материалов – фоторезистов, которые бывают позитивными и негативными. Негативные фоторезисты под действием света полимеризуются и становятся нерастворимыми в специальных веществах – травителях. После локальной засветки (экспонирования) растворяются и удаляются незасвеченные участки. В позитивных фоторезистах свет разрушает полимерные цепочки: растворяются засвеченные участки. Максимальная чувствительность соответствует более длинным волнам (до 0.45 мкм. – видимое излучение). Позитивные фоторезисты обеспечивают более резкие границы растворенных (проявленных) участков, чем негативные, т. е. обладают повышенной разрешающей способностью, но имеют меньшую чувствительность и требуют большего времени экспонирования.

Рисунок будущей маски задается фотошаблоном. Он представляет собой стеклянную или полимерную пластину, на одной из сторон которой нанесена тонкая непрозрачная пленка (Cr , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и др.) требуемой конфигурации.

Основные этапы процесса фотолитографии заключаются в следующем:

1. Формирование слоя фоторезиста: обработка поверхности подложек, нанесение и первая сушка фоторезиста.
2. Формирование защитного рельефа: экспонирование и совмещение, проявление, а также промывка, сушка, задубливание рельефа.
3. Передача изображения на подложку: травление профиля, удаление фоторезиста.

Обработка поверхности подложки имеет целью обеспечить хорошую адгезию фоторезиста к подложке. Фоторезисты наносят на поверхность кремния, поли-кремния, диоксида кремния, силикатных стекол и различных

металлических слоев. Подготовку поверхности кремния выполняют по схеме:

1. Поочередная отмывка в толуоле, амилацетате, ацетоне, этиловом спирте по 5 мин, нагрев до кипения с последующей УЗ-очисткой в порции свежего растворителя.
2. Кипячение в деионизованной воде 5 мин.
3. Промывка в HF 5 мин.
4. Кипячение в деионизованной воде 5 мин.

Нанесение фоторезиста осуществляют центрифугированием, пульверизацией, поливом, окунанием в раствор фоторезиста, накаткой. Наибольшее распространение получил способ центрифугирования. При включении центрифуги фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежной силы.

Первой сушкой заканчивается процесс формирования слоя фоторезиста. На этом этапе с удалением растворителя происходит формирование структуры полимерной пленки фоторезиста. Условия сушки в значительной степени влияют на качество ФЛГ в целом. Максимальную температуру сушки выбирают для каждого типа фоторезиста. Она определяется температурой деструкции его молекул.

Экспонирование и совмещение – операции, обеспечивающие перенос изображения с фотошаблона на пластину, - связаны между собой. Экспонирование – операция воздействия в течение некоторого времени на пленку фоторезиста световой энергии. Для удобства совмещения на фотошаблон и пластину наносят метки.

При проявлении скрытого изображения в фоторезистах удаляют ненужные участки слоя, после чего на поверхности пластины остается защитный рельеф, конфигурация которого соответствует рисунку на фотошаблоне.

Удаление экспонированных участков негативных резистов производят в органических растворителях, часто в тех же, на основе которых был сделан фоторезист.

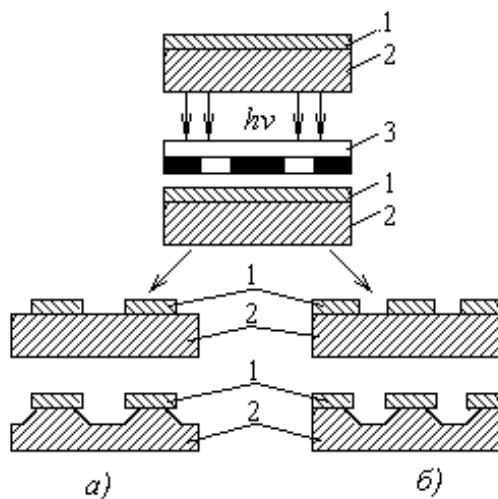
Сушка проявленного слоя производится для удаления остатков проявителя и дополнительной тепловой полимеризации фоторезиста, улучшающей его защитные свойства в процессе травления рельефа на подложке.

Задубливание. Кислотоустойчивость резиста повышается при задубливании, сопровождающемся полной полимеризацией маски. Задубливание можно проводить путем облучения интенсивным УФ-светом или путем термической обработки.

Травление. Рельеф на подложке травят в различных по составу травителях при различных режимах (в зависимости от типа подложки). В общем случае при травлении через защитную маску из фоторезиста травители должны обеспечивать локальность воздействия, не вызывать газовыделения, хорошо смачивать и поверхность фоторезистивной маски и подложки.



Удаление фоторезиста – завершающая операция технологического процесса фотолитографии, которая во многом определяет качество выполнения последующих циклов. Удаляют фоторезист деструкцией полимера кипячением в серной кислоте; обработкой в органических растворителях.



1 – фоторезист
2 – пластина полупроводника
3 – фотошаблон

Рисунок 6 – Схема процесса фотолитографии с негативным (а) и с позитивным (б) фоторезистами

1.5 ТРАВЛЕНИЕ

Травление – это удаление поверхностного слоя не механическим, а чаще всего химическим путем. Его применяют для получения максимально ровной (дефекты отсутствуют) поверхности пластин, не достижимой механическим путем, удаление диоксида кремния и других слоев с поверхности, формирование рисунка тонкопленочных слоев, а также масок.

При изготовлении диода применяют жидкостное травление. В основе его лежит химическая реакция жидкого травителя и твердого тела, в результате которой образуется растворимое соединение.

Локальное травление осуществляется через маску. Оно может быть изотропным и анизотропным.

Изотропное травление идет с одинаковой скоростью во всех направлениях. Этот процесс служит для травления слоя диоксида кремния через маску фоторезиста.

Основной компонент травления – плавиковая кислота HF . Размер W вытравливаемой области больше размера отверстия W_0 в маске на величину, превышающую удвоенную толщину d слоя диоксида кремния. В связи с этим жидкостное травление не позволяет получить в слое диоксида кремния отверстие достаточно малых размеров. Жидкостное травление обладает высокой избирательностью, количественно оцениваемой отношением скоростей травления требуемого слоя (например SiO_2) и других слоев (кремния, фоторезиста и т.д.)

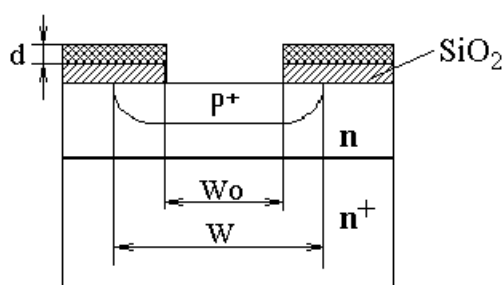


Рисунок 7 - Изотропное травление

1.6 ДИФФУЗИЯ

Диффузия примесей – это технологическая операция легирования, т. е. введение примесей в пластину или эпитаксиальную пленку. Примесные атомы поступают через поверхность и распространяются вглубь вследствие теплового движения.

Основной механизм проникновения примесного атома в кристаллическую решетку состоит в том, что этот атом последовательно перемещается вакансиям решетки. Возможны также перемещения по междоузлиям и обмен местами с соседними атомами. Для получения сильнолегированных областей и сокращения времени диффузии нужно иметь высокую концентрацию вакансий в поверхностном слое пластины.

Диффузия может осуществляться по всей поверхности пластины (общая) и на определенных ее участках (локальная). В первом случае образуется тонкий диффузионный слой, отличающийся от эпитаксиального неоднородностью по глубине распределения примеси. Во втором – примесь распределяется не только вглубь пластины, но и во всех перпендикулярных направлениях, то есть под маску. В результате участок p - n перехода оказывается автоматически защищен окислом. На практике глубина диффузионных слоев всегда меньше толщины пластины.

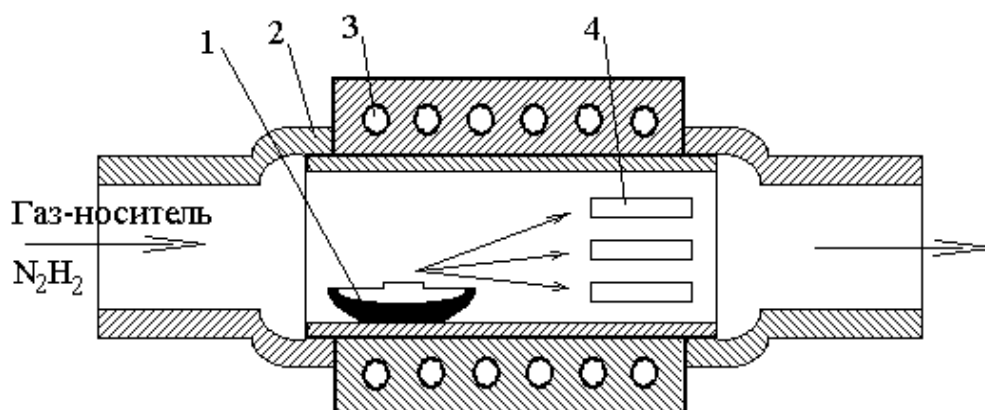


Рисунок 8 – Схема установки для проведения диффузии (1 – источник с испаряющимся диффузантом, 2 – кварцевая труба, 3 – индуктор, 4 – пластины кремния)

Если над пластинами избыток диффузанта, то у их поверхности быстро устанавливается максимальная концентрация примесей, близкая к предельной растворимости, которая далее не изменяется. Распределение концентраций примесей при таком режиме диффузии, называемой загонкой примеси, показано на рис. 6 для различного времени процесса и разных температур. Атомы примесей сосредоточены в узком приповерхностном слое. Назначение загонки в основном состоит в том, чтобы ввести определенную фазу легирования. Для окончательного формирования диффузионного слоя введенную примесь подвергают перераспределению на втором этапе – разгонке. Подачу диффузанта прекращают, примеси распространяются вглубь при постоянной дозе легирования, поверхностная концентрация уменьшается, а толщина слоя возрастает. На рис. 11 приведены графики функций $N(x)$ после загонки (1) и разгонки (2).

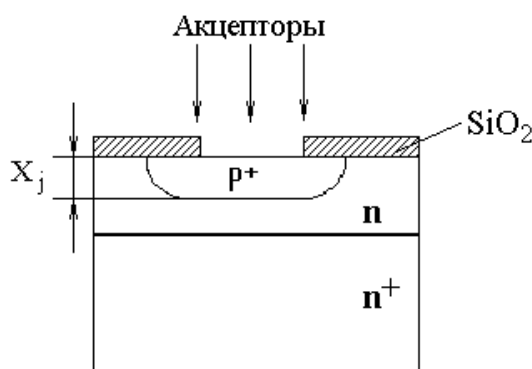


Рисунок 9 -Процесс диффузии примеси n-типа

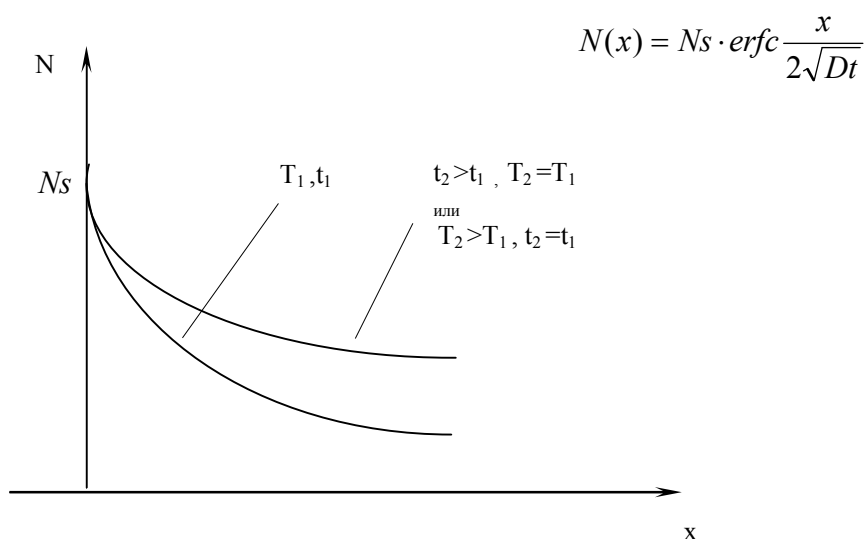


Рисунок 10 -Распределение концентрации примеси при диффузии из неограниченного источника

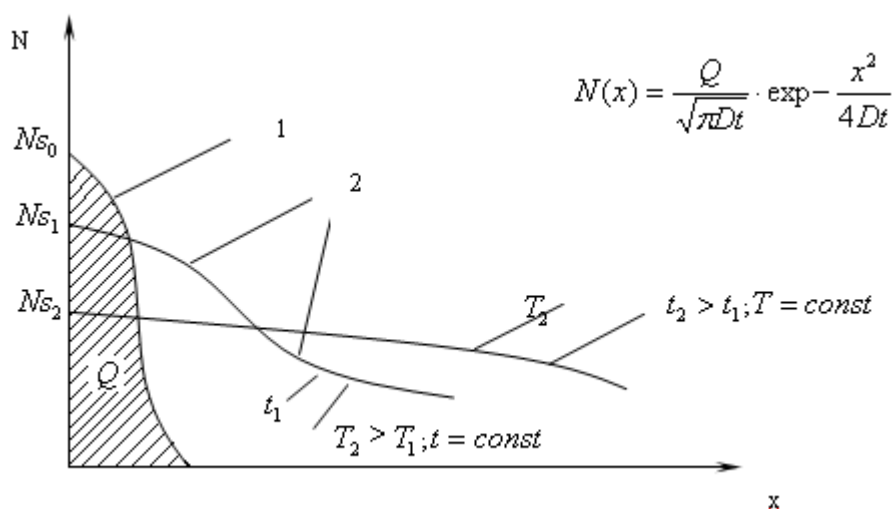


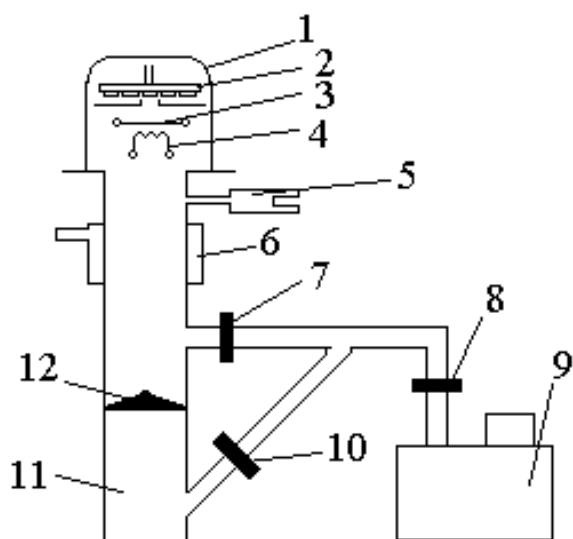
Рисунок 11 – Ограниченный источник. Распределение концентраций после загонки(1) и разгонки(2)

1.7 МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

После формирования р-п перехода необходимо провести процесс металлизации создание омического контакта для последующего использования перехода в качестве диода .

Омические контакты обычно изготавливают сплавлением, электрохимическим или химическим осаждением, вакуумным испарением, методом термокомпрессии или с помощью ультразвуковой сварки.

Процесс получения омических контактов заключается в следующем: тонкий слой металла, металлическую навеску или шарик, нанесенные на поверхность пластины, нагревают до температуры, при которой они плавятся. При этом происходит растворение в них небольшого количества полупроводника. При охлаждении системы полупроводник с растворенным в нем атомами металла и легирующими примесями кристаллизуется. Для улучшения смачиваемости поверхности полупроводника очищают от примесей и оксидных слоев. Применяют флюсы для удаления остаточной поверхностной пленки.



- 1 – рабочая камера
- 2 – пластины
- 3 – заслонка
- 4 – испаритель
- 5 – термопарный и ионизационный манометр
- 6 – ловушка с жидким азотом
- 7 – кран
- 8 – кран
- 9 – форвакуумный насос
- 10 – кран
- 11 – диффузионный насос
- 12 – клапан

Рисунок 12 – Схема вакуумной установки для напыления

Металлизация проводится одновременно на всей поверхности пластины. При этом образуется тонкая металлическая пленка, покрывающая всю поверхность. Для удаления ее везде, кроме площади контакта, проводят процессы фотолитографии и травления. После окончания очистки пластины от продуктов химических реакций проводят ее сушку и затем приваривают выводы к контактам для дальнейшего ее использования.

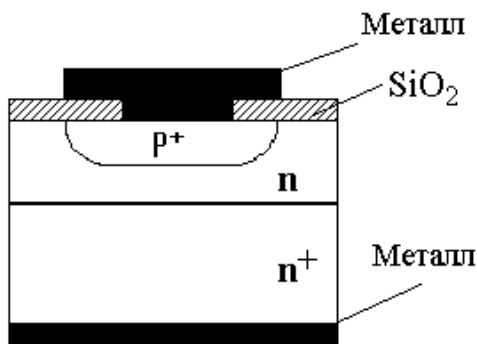


Рисунок 13 - Создание омических контактов

После помещения детали в корпус процесс изготовления заканчивают проверкой параметров. В результате вышеперечисленных операций формируют конструкцию следующего профиля:

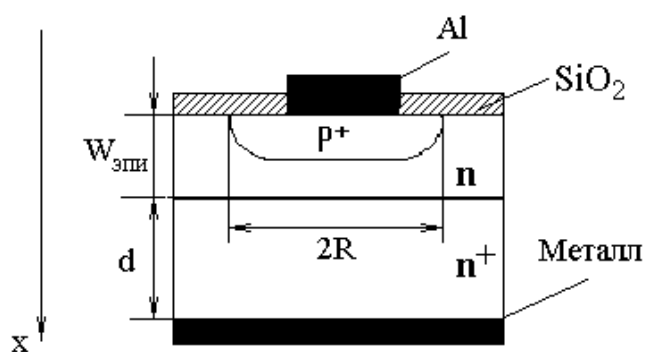


Рисунок 14 – Схематическое изображение планарного диода

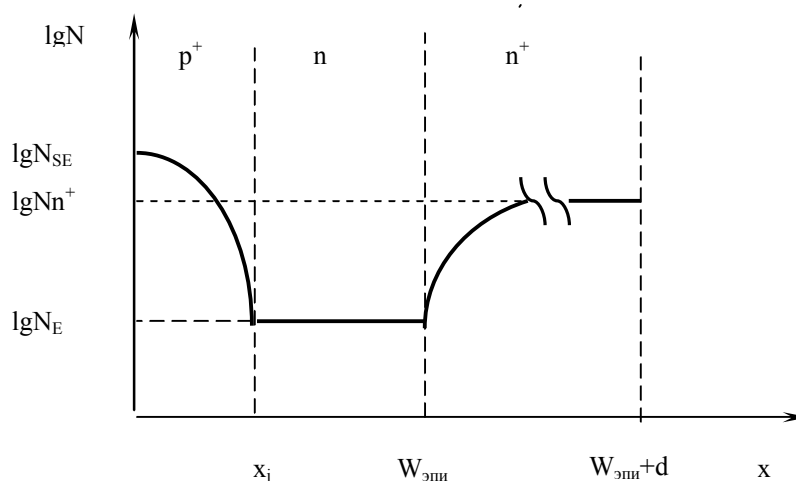


Рисунок 15 – Концентрационный профиль планарного диода

1.8 СКРАЙБИРОВАНИЕ

Для разделения пластин на кристаллы производят скрайбирование — нанесение сетки взаимно перпендикулярных рисок глубиной 10...15 мкм тонким алмазным резцом. Риски наносят с помощью алмазного резца в форме трех- или четырехгранной усеченной пирамиды. Основными преимуществами скрайбирования являются его высокая производительность и малая ширина реза, практически исключающая потери материала. Затем пластины раскалывают, помещая их на мягкую резиновую подкладку и прокатывая под небольшим давлением резиновые валики в направлении рисок. Во избежание смещения полос и кристаллов в процессе ломки пластину со стороны скрайбирования покрывают нейтральным быстросыхающим лаком. Из-за повреждения поверхности и нежелательных сколов на этом этапе неизбежно возникает брак, увеличивающийся с ростом толщины пластин. Чем больше диаметр пластин, тем больше их толщина, необходимая для достижения механической прочности. Поскольку СБИС выполняются на пластинах большого диаметра, то процент бракованных СБИС при механическом скрайбировании и раскалывании особенно велик. Для СБИС пригодны более немеханические способы разделения.

Одним из них является скрайбирование с помощью лазерного луча, позволяющее делать глубокие риски (100...200 мкм), а при многократном проходе- полностью разделять пластины на кристалле без раскалывания. Другим способом является сквозное анизотропное травление пластин. Немеханические методы обеспечивают значительно меньший брак и лучше поддаются автоматизации.

Далее кристаллы устанавливают в корпуса. Существует большое число типов корпусов, различающихся применяемыми материалами, способами герметизации, конструкцией выводов, показателями надежности и стоимости. По применяемым материалам корпуса подразделяют на металлокерамические, керамические, металlostеклянные, стеклянные, металлополимерные, пластмассовые и полимерные(приведены в порядке надежности и стоимости).

2 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ДИОДА

Расчет параметров диода, а также построение графиков производится на ЭВМ при помощи программ, написанных на языке Turbo Pascal, а также при помощи математического пакета Mathcad.

2.1 РАСЧЁТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДА

Как видно из рисунка 15, толщина базы диода W_b определяется по формуле:

$$W_b = W_{\text{эпи}} - X_j$$

где $W_{\text{эпи}}$ - толщина эпитаксиального слоя, X_j - глубина залегания p-n перехода.

Т.к. переход цилиндрической формы, то его площадь S и периметр P определяется:

$$S = \pi \cdot R^2$$

$$P = 2 \cdot \pi \cdot R$$

2.2 РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

Удельное сопротивление сильнолегированного эмиттера рассчитывается по формуле:

$$\rho_E = R_{SE} \cdot X_j$$

где R_{SE} - сопротивление диффузионного слоя эмиттера.

Степень легирования эмиттера, базы и подложки рассчитываются по формулам:

$$\rho_E = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(q \cdot \mu_p(N_E) \cdot N_E)}$$

$$\rho_B = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(q \cdot \mu_n(N_B) \cdot N_B)}$$

$$\rho_{n^+} = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(q \cdot \mu_n(N_{n^+}) \cdot N_{n^+})}$$

В этих формулах для расчета подвижностей носителей заряда, используются эмпирически полученные зависимости:

$$\mu_n(N) = 65 + \frac{1265}{\left(1 + \left(\frac{N}{6.2 \cdot 10^{16}}\right)^{0.72}\right)}$$

$$\mu_p(N) = 47.7 + \frac{447}{\left(1 + \left(\frac{N}{8.2 \cdot 10^{16}}\right)^{0.76}\right)}$$

где $\rho_E, \rho_B, \rho_{n^+}$ - удельные сопротивления сильнолегированного эмиттера, слаболегированной базы и подложки соответственно.

Подставляя значения концентраций N в уравнения и решая их, получим:

- Подвижность основных носителей заряда в эмиттере μ_{pE}
- Подвижность неосновных носителей заряда в эмиттере μ_{nE}
- Подвижность основных носителей заряда в базе μ_{pB}
- Подвижность неосновных носителей заряда в базе μ_{nB}

Расчет коэффициентов диффузии для неосновных носителей заряда в эмиттере и в базе:

$$D_{nE} = \varphi_T \cdot \mu_n(N_E)$$

$$D_{pB} = \varphi_T \cdot \mu_p(N_B)$$

для основных:

$$D_{pE} = \varphi_T \cdot \mu_{pn}(N_E)$$

$$D_{nB} = \varphi_T \cdot \mu_n(N_B)$$

где φ_T - тепловой потенциал (при $T = 300K$).

Оценка времени жизни носителей заряда в эмиттере и базе производится по формулам:

$$\tau_B = \tau_s$$

Рекомбинационное время жизни свойственно для прямых смещений, генерационное – для обратных смещений. На высоких уровнях легирования (в эмиттере), кроме рекомбинации Шокли - Холла-Рида, присутствует Оже – рекомбинация:

$$\tau_E^{+ -1} = \tau_{ES}^{-1} + \tau_A^{-1}$$

$$\tau_E^{-} = \tau_{ES}$$

$$\tau_A = \frac{1}{C_p \cdot N_E^2}$$

где $C_p = 2.8 \cdot 10^{-31}$

τ_E^{+} - время жизни для прямых смещений

τ_E^{-} - время жизни для обратных смещений

Так как темп рекомбинации больше темпа генерации, то $\tau_E^{+} < \tau_E^{-}$

Время жизни носителей в сильнолегированном эмиттере значительно меньше, чем в базе из-за влияния Оже – рекомбинации.

Диффузионная длина носителей заряда в эмиттере и базе рассчитывается по следующим формулам:

$$L_{pE} = \sqrt{D_{pE} \cdot \tau_E}$$

$$L_{nB} = \sqrt{D_{nB} \cdot \tau_B}$$

Степень легирования на поверхности эмиттера находится по формулам :

$$N_{SW} = 2 \cdot \eta \cdot N_E$$

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_{SE}}{N_B} \right)$$

2.3 РАСЧЕТ ОБРАТНЫХ ТОКОВ

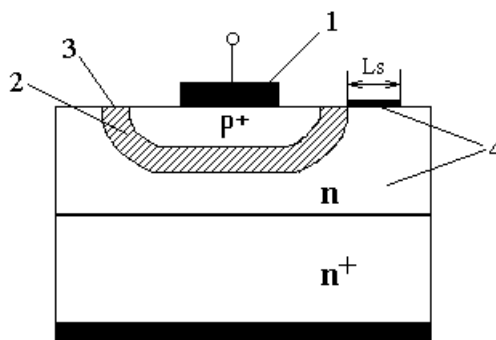


Рисунок 16 – Составляющие обратного тока диода

При расчете обратного тока будут учитываться четыре составляющих:

$$I_{обр} = \sum I_i = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

где I_1 - ток генерации в квазинейтральном объеме и на контактах;

I_2 - ток генерации в объеме ОПЗ;

I_3 - ток генерации на поверхности ОПЗ;

I_4 - ток генерации в пассивном объеме базы и на квазинейтральной поверхности.

Природа тока I_1 связана с тепловой генерацией и диффузией неосновных носителей заряда за счет экстракции, поскольку внешнее поле затягивает носители заряда и возникают диффузионные токи.

$$I_1 = S_E \cdot \left(\frac{q \cdot n_i^2 \cdot D_{nE}}{N_E \cdot L_{nE}} \cdot \text{cth} \frac{X_j}{L_{nE}} + \frac{q \cdot n_i^2 \cdot D_{pB}}{N_B \cdot L_{pB}} \cdot \text{th} \frac{W_B}{L_{pB}} \right)$$

Первый член соответствует электронному току генерации в объеме эмиттера и на омическом контакте ($\text{cth}(x_j/L_{nE})$). Второй член – дырочному току генерации в высокоомной n-базе; $\text{th}(W_B/L_{pB})$ отражает влияние неомического контакта n-n+. В высоколегированном n+-слое генерация дырок близка к нулю $P_{n+} = n_i^2/N_{n+} \approx 10 \text{ см}^{-3}$.

Природа тока I_2 связана с генерацией носителей заряда в объеме ОПЗ, что наиболее характерно для широкозонных полупроводников.

Природа тока I_3 связана с тем, что темп генерации на поверхности ОПЗ больше, чем в объеме. При достаточно большом периметре поверхности он может быть больше объемного тока генерации носителей. Величина этого тока зависит от технологии обработки поверхности.

Для широкозонных полупроводников (в частности, для кремния) преобладает генерация в ОПЗ и на ее поверхности, поэтому для p-n перехода ($\sigma \rightarrow 0$) ток I_2 оказывает более существенное влияние.

Процессы при обратном смещении:

1. Диффузия неосновных носителей заряда. Из-за экстракции неосновных носителей заряда из областей, примыкающих к контакту. Вследствие этого концентрация носителей заряда (не основных) у границы ОПЗ падает. В примыкающей к контакту области создается градиент концентрации не основных носителей

заряда и проходит диффузионный ток. При этом через р-п переход проходят неосновные носители, генерируемые в объеме полупроводника и на омическом контакте эмиттера.

2. Генерация носителей в ОПЗ. В ОПЗ идет процесс тепловой генерации носителей. Получившиеся пары электрон-дырка разделяются полем перехода, и протекает генерационная составляющая тока.
3. Поверхностные утечки (различные загрязнения на поверхность полупроводника приводят к образованию между внешними выводами проводящих слоев). В связи с тем, что обратные токи малы, поверхностные утечки оказываются, иногда, довольно существенны. Также на поверхности могут находиться ионные заряды, под действием которых индуцируются подвижные заряды в полупроводнике, приводя к образованию поверхностных каналов. В случае кремниевых планарных р-п переходов, ток поверхностной утечки гораздо меньше тока генерации в обедненном слое. Кроме того, на обратный ток влияет лавинное умножение, поверхностный пробой, изменение температуры.

$$I_2 = S_E \cdot \frac{q \cdot n_i \cdot \delta(U) \cdot \frac{\pi}{2}}{\tau_{eff}}$$

Для расчета тока генерации в ОПЗ используют эффективное время жизни τ_{eff} , которое характеризует совместное влияние темпа генерации со стороны эмиттера и базы, и определяется соотношением:

$$\tau_{eff} = \sqrt{\tau_B \cdot \tau_E^-}$$

Считаем, что переход резкий, тогда:

$$\delta(U_{обп}) = \left(\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (U_{обп} + U_0)}{q \cdot N_B} \right)^{1/2}$$

г где U_0 - контактный потенциал.

$$U_0 = \varphi_T \cdot \ln \frac{N_B \cdot N_E}{n_i^2}, \quad \text{где } n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \text{ при } T = 300\text{K}$$

Ток генерации на поверхности ОПЗ:

$$I_3 = P_E \cdot q \cdot n_i \cdot \delta(U) \cdot \sigma_{eff}$$

Ток генерации на квазинейтральной поверхности и пассивном объеме:

$$I_4 = S_{eff} \cdot \frac{q \cdot n_i^2 \cdot D_{pB}}{N_B \cdot L_S},$$

где S_{eff} - эффективная площадь коллектирования: $S_{eff} = 2\pi R \cdot x_j$,

а L_S - эффективная диффузионная длина: $L_S = \sqrt{D_{pB} \cdot \tau_S}$

где τ_S - поверхностное время жизни носителей:

$$\tau_S^{-1} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{2 \cdot \sigma}{W_{эни}}$$

где σ - скорость поверхностной генерации

2.4 ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОБРАТНОГО ТОКА

Зависимость от температуры обратного тока определяется температурными зависимостями темпа генерации.

В общем случае температурная зависимость обратного тока определяется выражением:

$$I = A \cdot \exp - \frac{E_a}{k \cdot T}$$

Для токов генерации в квазинейтральном объеме и на квазинейтральной поверхности энергия активации соответствует ΔE_g , для токов генерации в объеме и на поверхности ОПЗ - $\frac{\Delta E_g}{2}$.

При фиксированной температуре $T_0 = 300K$:

$$I_{10} = A \cdot T_0^3 \cdot \exp - \frac{\Delta E_g(T_0)}{k \cdot T_0}$$

При любой другой температуре T :

$$I_1(T) = A \cdot T^3 \cdot \exp - \frac{\Delta E_g(T)}{k \cdot T}$$

Тогда зависимость I_1 от температуры будет определяться выражением:

$$I_1(T) = I_{10} \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^3 \cdot \exp - \frac{\Delta E_g}{k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right]$$

Аналогично определяется зависимость и для других токов:

$$I_2(T) = I_{20} \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \exp - \frac{\Delta E_g}{2 \cdot k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right]$$

$$I_3(T) = I_{30} \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \exp - \frac{\Delta E_g}{2 \cdot k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right]$$

$$I_4(T) = I_{40} \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^3 \cdot \exp - \frac{\Delta E_g}{k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right]$$

$$I_{обр}(T) = I_1(T) + I_2(T) + I_3(T) + I_4(T)$$

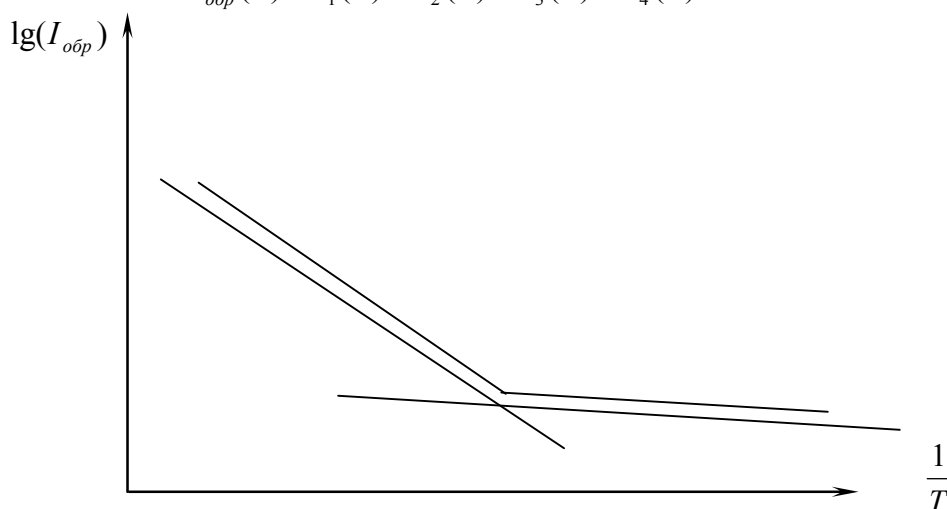


Рисунок 17 - График зависимости обратного тока от температуры

2.5 НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ

2.5.1 ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ

При большом обратном смещении на p-n переходе, которое создает в нем большое электрическое поле, переход «пробивается» и через него протекает очень большой ток. Существует четыре основных механизма пробоя: тепловая неустойчивость, туннельный эффект и лавинное умножение, инжекционный пробой (смыкание).

В данном случае туннельный пробой отсутствует, т.к. полупроводник не вырожденный, поэтому будем рассматривать только лавинный и тепловой пробой.

Тепловой пробой обусловлен тепловой неустойчивостью и определяет электрическую прочность большинства изоляторов и является основным фактором в полупроводниках. В p-n переходе при обратном напряжении протекает обратный ток и выделяется тепло. Увеличение обратного напряжения вызывает повышение температуры перехода. В свою очередь это приводит к возрастанию обратного тока. Резкое возрастание проводимости обусловлено термогенерацией типа зона-зона за счет повышения температуры перехода, которое является следствием выделения электрической мощности:

$$P = I_{обр}(T) \cdot U_{обб}$$

В данном случае существует положительная токотемпературная связь. Поведение прибора зависит от теплоотвода: если прибор теплоизолирован, то необходимо обеспечить теплоотдачу, в противном случае возникнет пробой. Теплоотдача осуществляется тремя механизмами:

1. Теплопроводность
2. Конвекция
3. Излучение

В общем случае свойства теплоотдачи характеризуются тепловым сопротивлением:

$$R_T = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

Поэтому, чем меньше тепловое сопротивление, тем быстрее тепло будет отводиться в окружающую среду.

Количество отдаваемого тепла:

$$Q_{отд} \propto \frac{1}{R_T} \cdot (T_j - T_o)$$

Из соотношения следует, что чем больше разность температур, тем лучше тело отдает тепло в окружающую среду.

При обратном смещении идут конкурирующие процессы:

1. Отдача тепла
2. Выделение тепла

При выполнении следующего условия еще сохраняется устойчивое

состояние:

$$\frac{dP_{\text{выд}}}{dT} \leq \frac{dP_{\text{омд}}}{dT} \equiv \frac{1}{R_T}$$

Пробой наблюдается в том случае, когда выполняется условие пробоя:

$$\frac{dP_{\text{выд}}}{dT} \geq \frac{1}{R_T}$$

Напряжение теплового пробоя определяется шириной запрещенной зоны, тепловым сопротивлением конструкции и окружающей температурой. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем выше напряжение теплового пробоя. При увеличении теплового сопротивления и прочих равных условиях напряжение теплового пробоя падает. При возрастании температуры величина обратного тока сильно возрастает и уже при малых напряжениях выделяется мощность, достаточная для пробоя.

Напряжение теплового пробоя рассчитывается по формуле:

$$U_B^{\text{th}} = \frac{k \cdot T^2}{R_T \cdot \Delta E_g \cdot I_{\text{обр}}(T) \cdot \exp l}$$

Зависимость $U_B^{\text{th}}(T)$ определяется в основном $I_{\text{обр}}(T)$.

Тепловой пробой характеризуется шнурованием тока в наиболее горячей области, в результате чего происходит механическое разрушение - термоудар. Максимально допустимая температура определяется по следующим формулам:

Тепловой пробой кремниевого p-n перехода:

$$T_{\text{max}} = \frac{6400}{1043 + \ln \rho_B}$$

Ограничение конструкции – отпайка кристалла:

$$T_{\text{max}} = T_o + P_{\text{max}} \cdot R_T,$$

где R_T – тепловое сопротивление диода

P_{max} - максимальная рассеиваемая мощность.

Выбирают минимальное значение.

Максимальный ток в режиме стабилизации.

Ограничение конструкцией диода:

$$I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{U_B}$$

Ограничение тепловым пробоем:

$$I_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}} - T_0}{R_T \cdot U_B}$$

Выбирают минимальное значение.

2.5.2 ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ

Лавинное умножение происходит вследствие ударной ионизации и является наиболее важным механизмом пробоя р-п переходов. Напряжение лавинного пробоя определяет верхний предел обратного напряжения большинства диодов. В данной работе расчет напряжения лавинного пробоя проводится с помощью условия критической напряженности поля. Электрическое поле и потенциал обедненного слоя находятся из уравнения Пуассона. В кремниевом р-п переходе максимальная напряженность поля определяется выражением:

$$E_K = \frac{4 \cdot 10^5}{1 - \frac{1}{3} \cdot \lg \frac{N}{10^{16}}}$$

Напряжение лавинного пробоя идеального полубесконечного диода с резким р-п переходом в низколегированной области определяется по следующей формуле:

$$U_{BO} = 5.4 \cdot 10^{13} \cdot N_B^{-0.75}$$

С учетом толщины базы, напряжение смыкания:

$$U_B^{cm} = U_{BO} \cdot \left(\frac{W_B}{\delta(U_{BO})} \right) \cdot \left(2 - \frac{W_B}{\delta(U_{BO})} \right)$$

В ряде случаев смыкание не происходит и лавинный пробой возникает на периферии р-п перехода, где максимальна напряженность поля при цилиндрическом распределении примеси (круговая топология эмиттера). Напряжение лавинного пробоя рассчитывается по формуле:

$$U_B = U_{BO} \cdot f(X_j),$$

где $f(X_j) < 1$ учитывает пространственную кривизну на периферии р-п перехода:

$$f(X_j) = \frac{X_j}{\delta(X_j)} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{\delta(U_{BO})}{X_j} + 1} - 1 \right)$$

Для планарного диода, работающего без смыкания, величина области обеднения при пробое является нижним пределом для толщины базовой области.

Суть явления лавинного пробоя состоит в том, что носители заряда, разогнавшись в сильном электрическом поле, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов полупроводника, т.е. для образования новых носителей заряда. Такой процесс носит лавинообразный характер и приводит к значительному увеличению обратного тока через р-п переход.

С повышением температуры напряжение лавинного пробоя увеличивается. Это можно объяснить тем, что горячие носители, проходя через ОПЗ, где локализовано все поле, теряют часть своей энергии при

столкновении с оптическими фононами. Средняя длина свободного пробега электронов между электрон-фононными столкновениями падает с повышением температуры. Поэтому при повышенной температуре носители отдают кристаллической решетке часть энергии. Следовательно, для того чтобы носители набрали энергию, достаточную для генерации электронно-дырочных пар, требуется большая разность потенциалов.

В общем случае зависимость напряжения лавинного пробоя от температуры можно представить в виде квазилинейной функции:

$$U_{BO}(T) = U_{BO} \cdot (1 + \alpha \cdot T),$$

где α - температурный коэффициент напряжения лавинного пробоя:

$$\alpha = \frac{1}{U_B} \cdot \frac{dU_B}{dT} > 0$$

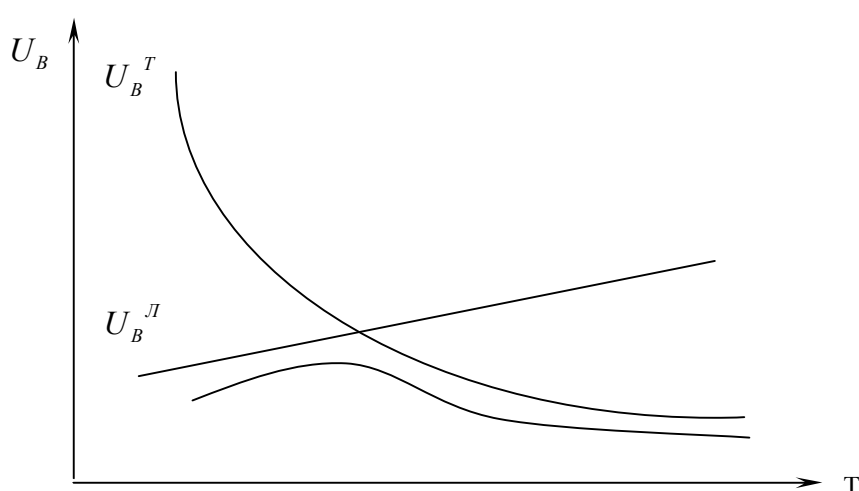


Рисунок 18 - График зависимости напряжения пробоя от температуры

2.6 РАСЧЕТ ПРЯМОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Сумма падений напряжения на самом р-п переходе, на базе, в эмиттере, на подложке и контактах составляет прямое падение напряжения:

$$U_{np} = U_j^{p-n} + U_{B1}^{p+} + U_{B2}^{n-} + U_{подл}^{m+} + U_{конт1} + U_{конт2}$$

где U_j^{p-n} - падение напряжения на р-п переходе.

$$U_j = \phi_T \cdot \ln \frac{I_{np}}{I_0}$$

I_0 - ток инжекции:

$$I_0 = S_E \cdot \frac{q \cdot D_{pB} \cdot n_i^2}{N_B \cdot L_B} \cdot th \frac{W_B}{L_{pB}}$$

U_{B1} - падение напряжения на эмиттере:

$$U_{B1} = R_E \cdot I_{np} = \rho_E \cdot \frac{X_j}{S_E} \cdot I_{np}$$

U_{B2} - падение напряжения на промодулированной базе:

$$U_{B2} = \varphi_T \cdot \frac{2 \cdot b}{(b+1)^2} \cdot \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2,$$

$$\text{где } b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$$

U_n - падение напряжения на подложке:

$$U_n = \frac{r \cdot \rho_n \cdot W_n}{S_E + S_{kp}} \cdot I_{np}$$

U_{k1} - падение напряжения на эмиттерном контакте:

$$U_{k1} = \frac{\rho_{SkE}}{S_E} \cdot I_{np}$$

U_{k2} - падение напряжения на контакте подложки:

$$U_{k2} = \frac{\rho_{Skподл}}{S_{kp}} \cdot I_{np}$$

2.7 ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРЯМОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Температурная зависимость прямого падения напряжения на диоде обусловлена зависимостью электрофизических параметров от температуры. Наибольшее влияние оказывает зависимость $I_0(T)$. Зависимость $n_i(T)$ очень сильная и является доминирующей, поэтому падение напряжения уменьшается с ростом температуры.

$$U_j(T) = \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{I_{np}}{I_0(T)} \right)$$

$$I_0(T) = S_E \cdot \frac{q \cdot D_p(T) \cdot n_i^2(T)}{N_B \cdot L_p(T)} \cdot th \frac{W_B}{L_p(T)}$$

$$L_p(T) = \sqrt{D_p(T) \cdot \tau_p}$$

$$D_p(T) = \mu_p(T) \cdot \frac{k \cdot T}{q}$$

$$\mu_p(T) = \mu_p(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\alpha_p}$$

$$\alpha_p = 2,3 - 0,29 \cdot \ln \left(1 + \frac{N_B}{5,6 \cdot 10^{15}} \right)$$

Зависимость падения напряжения на базе от температуры определяется зависимостью подвижности от температуры:

$$U_{B2}(T) = \varphi_T \cdot \frac{2 \cdot b}{(b+1)^2} \cdot \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2$$

$$\mu_n(T) = \mu_n(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\alpha_n}$$

Падение напряжения на омических сопротивлениях эмиттера и подложки, определяются зависимостью $\mu(T)$:

$$U_{B1} = \rho_E \cdot \frac{X_j}{S_E} \cdot I_{np}$$

$$\rho_E(T) = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(q \cdot \mu_p(T) \cdot N_E)}$$

$$U_{под}(T) = \frac{\rho_{под} \cdot 2 \cdot d}{S_E + S_{кр}} \cdot I_{np}$$

$$\rho_{под}(T) = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(q \cdot \mu_n(T) \cdot N_{под})}$$

2.8 РАСЧЕТ ВОЛЬТ–ФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Диоды с р-п переходами обладают емкостными свойствами, что связано с пространственными перераспределениями заряда электронов и дырок при приложении внешнего напряжения к р-п переходу. Ёмкость р-п перехода в сильной степени определяет быстродействие переходов и приборов на их основе.

Зарядная емкость р-п перехода связана с изменением заряда в ОПЗ. При изменении напряжения на величину ΔU , изменяется толщина ОПЗ. Это связано с изменением объёмного заряда нескомпенсированных ионов на величину ΔQ (из-за протекания носителей заряда соответствующего знака к соответствующим сторонам границ ОПЗ). Эта емкость является физической и способна накапливать энергию и разряжаться во внешнюю цепь.

Для резкого р-п перехода:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{d(qN\delta(U))S}{dU} = S \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\delta(U)},$$

где $\delta(U)$ - толщина ОПЗ

$$C(U_{обр}) = S \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot N_B}{2 \cdot (U_0 + U_{обр})}}$$

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЁМКОСТИ

Температурная зависимость емкости определяется в основном контактным потенциалом U_0 и зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры (эта зависимость слабо выражена). При повышении температуры потенциальный барьер понижается и происходит частичная нейтрализация ОПЗ, в то время как, контактный потенциал задает начальную толщину ОПЗ.

В общем случае температурная зависимость емкости определяется выражением:

$$C(T) = S \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon(T) \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot N_B}{2 \cdot (U_0(T) + U_{обр})}},$$

где

$$U_0(T) = \frac{\Delta E_g}{q} - \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_C N_V}{N_A N_D}\right).$$

Из данной зависимости видно, что емкость практически не зависит от температуры, и чем больше величина обратного напряжения, тем меньше емкость зависит от температуры.

2.9 ЗАВИСИМОСТЬ ДОБРОТНОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ

Качество диодов определяется такими параметрами, как добротность Q . Добротность определяют отношением реактивного сопротивления к активному. Эквивалентная схема и схематическое изображение диода показаны на рисунке:

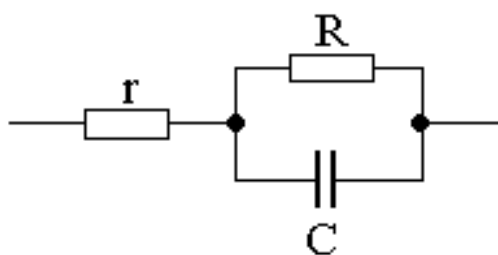


Рисунок 19 - Эквивалентная схема диода на малом переменном сигнале

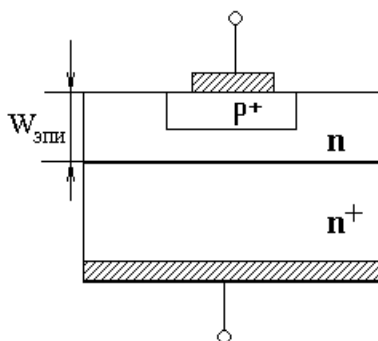


Рисунок 20 – Схематическое изображение планарного диода

$$Q = \frac{X_c}{\text{Re}[Z]}$$

Для резкого перехода:

$$R = \frac{\partial U_{обр}}{\partial I_{обр}} = 2 \cdot \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$$

$$r = r_E + r_B + r_{подл}$$

$$r_E = \rho_E \cdot \frac{X_j}{S_E}$$

$$r_B = \rho_B \cdot \frac{W_{B0} - \delta(U)}{S_E}$$

$$r_{подл} = \rho_{подл} \cdot \frac{2 \cdot W_{подл}}{S_E + S_{кр}}$$

Добротность разделяется на $Q_{нч}$ и $Q_{вч}$:

$$Q_{нч} = R \cdot \omega \cdot C$$

$$Q_{вч} = \frac{1}{r \cdot \omega \cdot C}$$

$$Q^{-1} = Q_{нч}^{-1} + Q_{вч}^{-1}$$

где $Q_{нч}$ - добротность на низкой частоте.

$Q_{вч}$ - добротность на высокой частоте.

$$Q = \frac{1}{r \cdot \omega \cdot C + \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}}$$

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R(T)}{r(T)}}$$

$$\omega_{\max} = \frac{1}{C(T)} \cdot \sqrt{\frac{1}{r \cdot R}}$$

Зависимость $Q_{нч}$ - от температуры:

$$Q_{нч} = R(T) \cdot \omega \cdot C(T) = \frac{2 \cdot U_{обр}}{I_{обр}} \cdot \omega \cdot C(T)$$

Так как $I_{обр} \sim \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{k \cdot T}\right)$, то зависимость $Q_{нч}$ определяется этим соотношением.

Зависимость $Q_{вч}$ от температуры:

$$Q_{вч} = \frac{1}{r(T) \cdot \omega \cdot C(T)}$$

$$r(T) = \frac{W_B \cdot \delta(U)}{q \cdot \mu(T) \cdot N_B \cdot S_E}$$

2.10 РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для получения зависимостей $t_{восст} = f(I_{np})$ при $U_{обр} = const$ и $t_{восст} = f(U_{обр})$ при $I_{np} = const$ воспользуемся следующими формулами:

$$\operatorname{erfc} \sqrt{\frac{t_1}{\tau}} = \frac{I_{обр}}{I_{обр} + I_{np}}$$

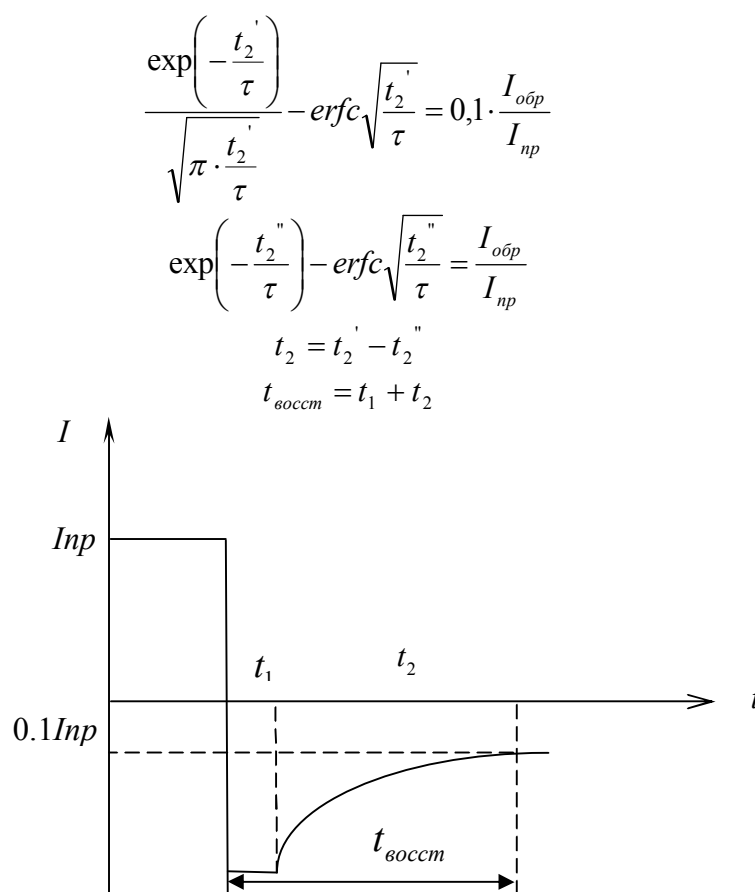


Рисунок 21(а) – Импульсная переходная характеристика диода
Процесс спада обратного тока описывается теми же уравнениями и не зависит от плотности тока.

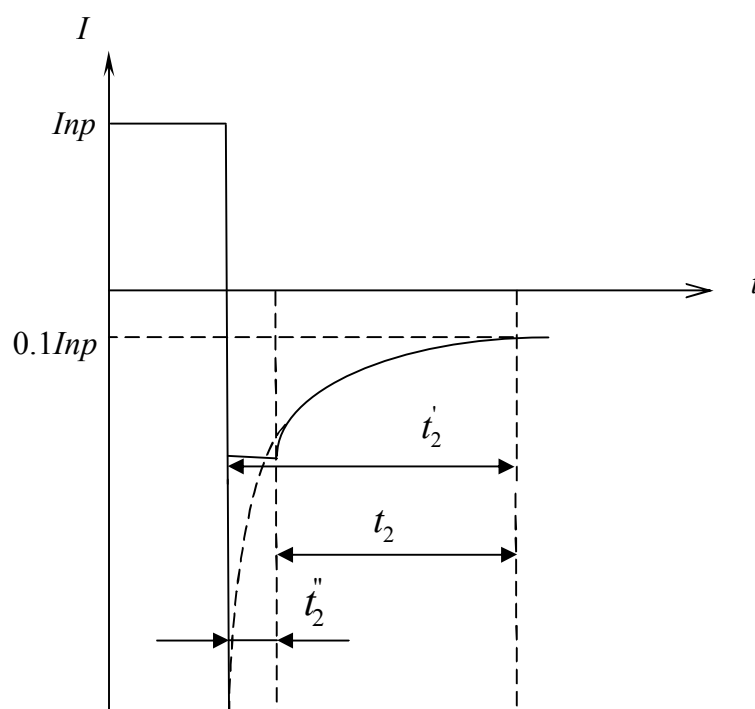


Рисунок 21(б) – К определению второй фазы переходного процесса t_2 .