

2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

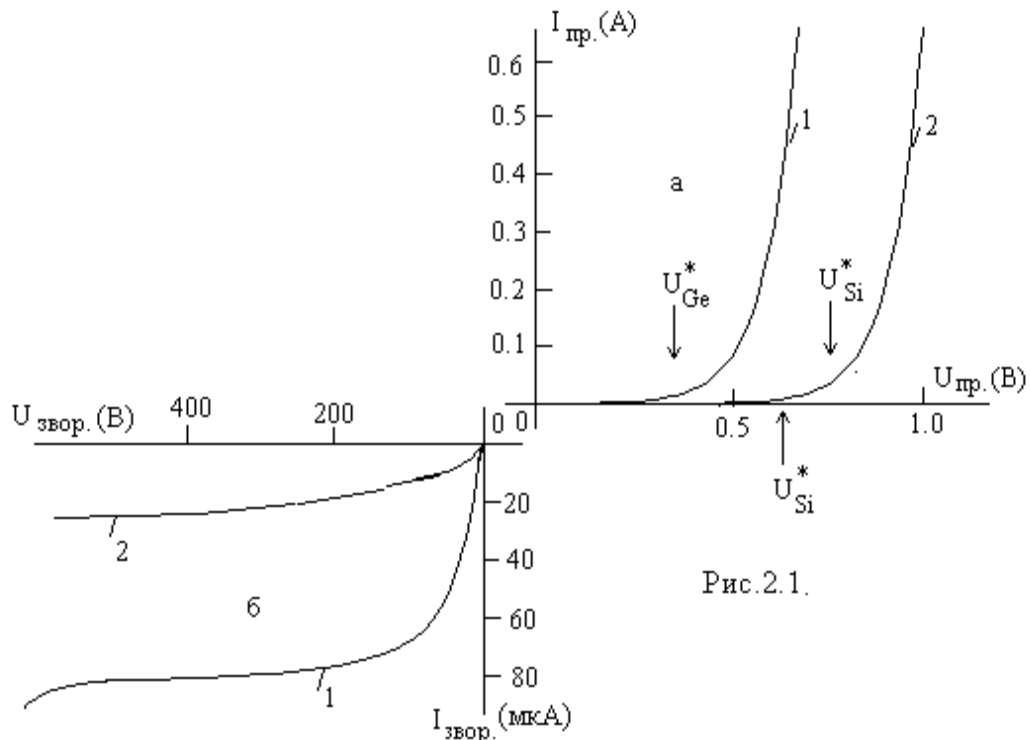
Описані вище властивості електронно-діркових переходів знаходять практичне застосування у напівпровідникових діодах. Напівпровідниковим діодом називається електронний прилад з двома виводами, який містить один $p-n$ перехід.

З усіх розглянутих вище властивостей $p-n$ переходу найбільш істотним, безумовно, є його одностороння провідність, яка обумовлює можливість проходження струму через діод тільки у одному напрямі. Саме ця властивість знаходить широке застосування для випрямлення електричного струму, тобто перетворення змінного струму в постійний.

2.1. Випрямляючі діоди

Для випрямлення струму використовуються германієві або кремнієві площинні діоди, у яких розміри площі $p-n$ контакту набагато більші від товщини збідненого шару і глибини, на яку здатні проникнути за рахунок дифузії інжектвані у базу неосновні носії. Значна площа контакту забезпечує можливість проходження через такі діоди досить великих струмів.

Типові вольтамперні характеристики для германійового (1) та кремнієвого (2) випрямляючих діодів зображені на рис.2.1. Області прямого та зворотного струмів і напруг зображені тут у різних масштабах.



Для германійових діодів істотний прямий струм починається практично з напруги $U_{Ge}^* \cong 0.1 - 0.2$ В, а у кремнієвих з $U_{Si}^* \cong 0.6 - 0.7$ В. При $U > U^*$ струм швидко зростає, досягаючи номінальної величини при напрузі порядку 0.5-1.0 вольт. При напрузі $0 < U < U^*$ прямий струм, хоча і існує, але він набагато менший від номінального і його існуванням можна нехтувати.

Зворотний струм у германійових діодах на 2 - 3 порядки, а у кремнійових на 3 - 4 порядки менший за прямий номінальний струм.

Загин вольтамперної характеристики зворотного струму для германійового діода вказує на наближення до режиму пробою. Максимальна зворотна напруга, яку спроможні витримати випрямляючі діоди, складає звичайно кілька сотень вольт і не перевищує 1кВ.

Для роботи з більшими напругами діоди можна з'єднувати послідовно, шунтуючи їх, однак, досить великими однаковими опорами, щоб гарантувати рівномірність розподілу зворотної напруги. Іноді послідовно увімкнені діоди об'єднують в одному корпусі (разом з шунтуючими опорами) і утворюють так звані випрямляючі стовпи або блоки.

Кремнійові діоди більш стійкі до підвищення температури і можуть успішно працювати до 120 - 130°C, тоді як температурна межа для германійових діодів складає лише 70 - 80°C. Звідси випливає, що германійові діоди доцільно використовувати для випрямлення сильних струмів малої напруги, тоді як кремнійові, діоди, для яких характерні порівняно великий спад напруги у прямому режимі, але більша стійкість до зворотної напруги, більш придатні для випрямлення невеликий струмів високої напруги.

Основні практичні параметри випрямляючих діодів такі:

$I_{пр\ max}$ - гранично допустимий середній прямий струм ¹;

$U_{звор\ max}$ - гранично допустима зворотна напруга;

$U_{пр}$ - постійна пряма напруга на діоді при номінальній величині струму;

$I_{звор\ max}$ - зворотний струм при гранично допустимій зворотній напрузі;

T_{max} - гранично допустима температура навколишнього середовища.

На основі цих параметрів робиться вибір типу діода для роботи в приладах для випрямлення струму.

2.2. Діоди Шотткі

На основі *p-n* переходів будується більшість випрямляючих діодів. Разом з тим все більше зростає інтерес до діодів, у яких використовується контакт металу з напівпровідником. Такий контакт був вперше вивчений німецьким фізиком Шотткі і тому дістав назву переходу Шотткі. А діоди засновані на використанні такого переходу - назву діодів Шотткі.

Ми не будемо розглядати фізику роботи такого переходу, бо вона є досить складною і потребує застосування зонної теорії напівпровідників. Це не є предметом нашого курсу, а тому ми обмежимося лише вказівками на деякі властивості таких переходів, що мають істотне значення для їх практичного застосування.

Ось основні відмінності переходів Шотткі порівняно зі знайомими нам *p-n* переходами:

- 1) При роботі переходу Шотткі у режимі відкритої полярності у напівпровідник *не інжектуються* неосновні носії. Тому в ньому не утворюється об'ємний заряд неосновних носіїв, відсутня дифузійна ємність і отже усі пов'язані з цим інерційні ефекти. Тому інерційність діодів Шотткі визначається лише бар'єрною ємністю і набагато менша від інерційності діодів з *p-n* переходами.

¹ Іноді як параметр дається і гранично допустимий імпульсний струм, який може протікати через діод протягом коротких проміжків часу.

2) Вольтамперна характеристика переходу Шотткі для прямого струму починається практично з нуля ($U^* \cong 0$) і іде стрімко вверх. Тому спад напруги для прямого струму на переході Шотткі невеликий і складає лише декілька десятих вольта. Отже і омичне нагрівання таких переходів виявляється меншим, аніж у $p-n$ переходів. До того ж оскільки один з електродів переходу Шотткі є металом, тут можна створити краще відведення тепла і працювати з великими густинами струму.

Отже по цілому ряду властивостей переходи Шотткі і побудовані на їх основі випрямляючі діоди мають певні переваги порівняно з діодами на $p-n$ переходах. Але технологія виготовлення діодів Шотткі складніша, вони дорожчі і тому застосовуються лише там, де їх високі якості дійсно потрібні.

2.3. Високочастотні діоди

Однією з таких областей, де діоди Шотткі знайшли широкого застосування, є високочастотні діоди для випрямлення (детектування) сигналів з частотами вищим від 1 ГГц.



Спершу такі діоди являли собою просто контакт металевого вістря (пружинки) з поверхнею напівпровідника (рис.2.2). Пропусканням імпульсу сильного струму вістря приварювалося до напівпровідника.

Рис.2.2.

Сучасні високочастотні діоди Шотткі виготовляються шляхом напилювання металевої плівки на поверхню кристалу з арсеніду галію. Площа таких контактів для ВЧ - діодів складає лише кілька квадратних мікрометрів і бар'єрна ємність таких контактів є дуже малою.

Але і величина струму, який може бути випрямлений таким контактом, також мала і не перевищує кількох міліамперів. Подібні діоди успішно працюють до частот порядку сотень ГГц, тобто аж до субміліметрового діапазону і являють єдиний спосіб обробки таких сигналів.

2.4. Стабілітрони і стабістори

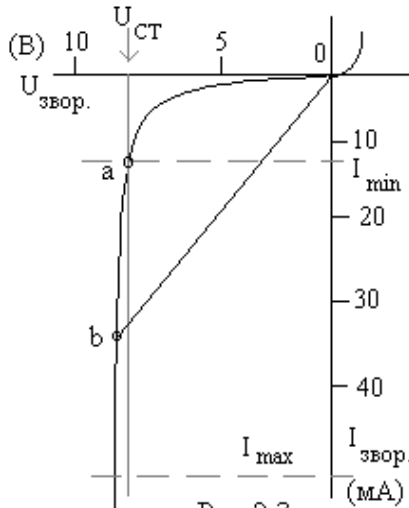


Рис. 2.3.

Для стабілізації напруг від кількох одиниць до кількох десятків вольтів використовуються спеціальні кремнієві площинні діоди, які мають назву стабілітронів або опорних діодів. Для їх роботи використовують зворотну ділянку вольтамереної характеристики (ВАХ) при напрузі, що відповідає напрузі пробою (рис.2.3).

На цій ділянці, починаючи з деякої напруги, позначеної як $U_{СТ}$, спостерігається стрімке зростання зворотного струму. Особливість цієї ділянки ВАХ полягає в тому, що на ній диференціальний опір $r_d = \frac{dU}{dI}$, визначений як нахил характеристики до вісі ординат, набагато менший від омичного опору $R_0 = \frac{U}{I}$, який можна зобразити як нахил січної "ob" до тієї ж вісі. У стабілітронах ця відмінність є величиною одного-двох порядків.

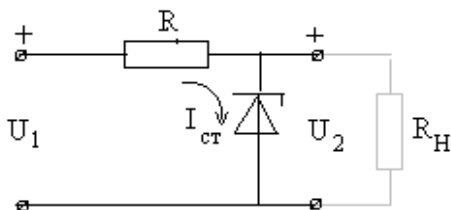


Рис. 2.4.

Схему стабілізатора напруги зі стабілітроном зображено на рис.2.4. Вона є подільником входної напруги U_1 , яку вважатимемо складеної з постійної (режимної) напруги U_{10} і деякого невеликого приросту ΔU_1 . Відповідно і вихідну напругу і струм

можна зобразити як суми подібних же складових:

$$U_2 = U_{20} + \Delta U_2;$$

$$I = I_0 + \Delta I;$$

Для постійної складової струму стабілітрон є омичним опором R_0 , отже відношення U_{20} до U_{10} можна записати так:

$$\frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{R_0}{R + R_0}.$$

Але для приросту струму стабілітрон є диференціальним опором $r_d = \frac{\Delta U_2}{\Delta I}$ і тоді відношення ΔU_2 до ΔU_1 буде дорівнювати

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{r_d}{R + r_d}.$$

Тепер запишемо співвідношення відносних приростів напруг на вході і на виході:

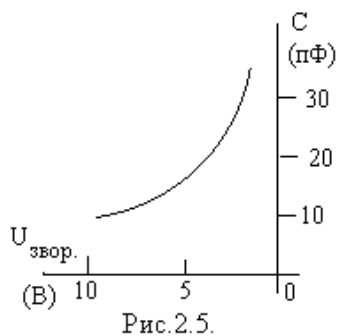
$$\frac{\Delta U_1 / \Delta U_{10}}{\Delta U_2 / \Delta U_{20}} = \frac{R + r_d}{r_d} \frac{R_0}{R + R_0} = k_{СТ}.$$

Це і є коефіцієнт стабілізації k_{CT} , який показує, наскільки відносні коливання напруги на виході менші ніж на вході. Оскільки звичайно $r_d \ll R, R_0$, то ця величина буває досить значною.

Робоча ділянка характеристики стабілітрона обмежена граничними струмами: від I_{\min} , починаючи з якого хід характеристики стає прямолінійним, до I_{\max} , вище якого перегрівання стабілітрона стає небезпечним. Від ширини цієї ділянки ВАХ залежать допустимі зміни U_1 , в межах яких можлива успішна стабілізація вихідної напруги.²

Аналогічно працює і стабістор, який являє собою звичайний діод у режимі провідності. Тут також використовується відмінність між диференціальним та омичним опорами діода, але вже для прямого струму (див. рис.2.1). Ця відмінність особливо помітна для малих струмів. За допомогою стабістора вдається стабілізувати малі напруги порядку десятих часток вольт.

2.5. Варікап



Як вже йшлося, при заперній полярності на границі $p-n$ переходу утворюється шар, збіднений носіями заряду, який має властивості діелектрика. Ємність утворена цим шаром, називається бар'єрною ємністю. Оскільки товщина збідненого шару залежить від прикладеної заперної напруги, з'являється можливість керувати величиною бар'єрної ємності шляхом зміни величини цієї напруги. Зазначений ефект використовують у спеціальних напівпровідникових приладах, так званих *варікапах* для створення електрично керованих ємностей.³

Вольтфарадна характеристика варікапа зображена на рис.2.5. Загальна ємність варікапа може змінюватись у півтора-два рази при середньому значенні порядку одиниць, десятків або сотень пікофарад. Варікапи можуть використовуватися, наприклад, для електричного налаштування коливних контурів у радіоприймальних пристроях.

2.6. Тунельний діод

Принцип дії тунельного діода ми тут не розглядатимемо, оскільки для того, щоб його зрозуміти, потрібні спеціальні знання з квантової механіки та фізики твердого тіла. Обмежимося лише розглядом його вольтамперної характеристики, яка має досить специфічний вигляд (рис.2.6).

² Все це буде так, якщо стабілізатор не навантажений опором R_H . Якщо такий опір є, то його слід додати паралельно до r_d і до R_0 .

³ Назва варікап походить від англійських слів vary (мінюю) і capacity (ємність).

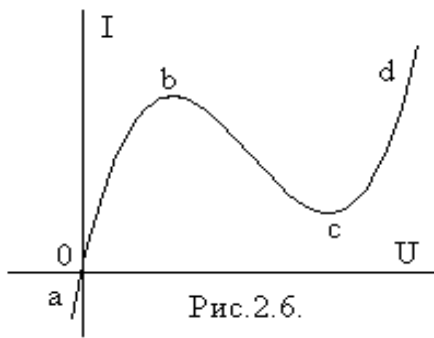


Рис.2.6.

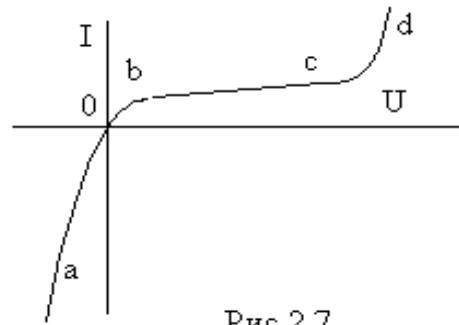


Рис.2.7.

При зворотній полярності тунельний діод відкритий (ділянка ao). При прямій полярності ділянка зростання струму ob переходить у ділянку bc , де збільшення напруги супроводжується зменшенням струму. На цій ділянці диференціальна провідність тунельного діода (та його диференціальний опір) будуть від'ємними, хоча омичний опір залишається позитивним. Далі, починаючи з точки c спостерігається нове зростання струму і на ділянці cd диференціальна провідність знову стає позитивною.

Існування режиму з від'ємним диференціальним опором є дуже цікавою властивістю тунельного діода, яка обумовлює можливість його використання для генерації високочастотних коливань.

Варіантом тунельного діода є так званий обернений діод, у якому немонотонність ходу вольтамперної характеристики при прямій полярності зведена до нуля (рис.2.7). Його ВАХ нагадує вольтамперну характеристику звичайного діода, але повернуту навколо початку координат на 180° . Відкритою полярністю для нього є зворотна, а закритою - пряма. Обернений діод може бути використаний для детектування сигналів. Як тунельний, так і обернений діоди знаходять застосування у техніці надвисоких частот.

2.7. Умовні зображення і позначення діодів

На закінчення наведемо умовні позначення різних типів діодів, які застосовуються при зображенні радіоелектронних схем (рис.2.8). Тут a - діод випрямляючий, детекторний, змішувальний; b - стабілітрон; $в$ - варікап; $г$ - тунельний; d - обернений; e - діод Шотткі.

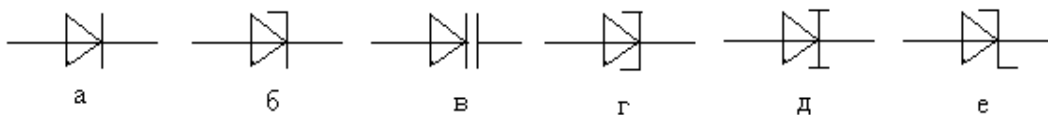


Рис.2.8.

За існуючим стандартом номінація різних типів діодів складається з п'яти літер і цифр.

Перший елемент (літера або цифра) характеризує матеріал, з якого виготовлений діод: Г (або 1) - германій, К (або 2) - кремній, А (або 3) - арсенід галію.

Другий елемент (літера) характеризує клас діодів за їх призначенням: Д - випрямляючі, А - надвисокочастотні, С - стабілітрони, И - тунельні, Ц - стовпи та блоки.

Третій елемент (цифра) більш докладно характеризує прилад у своєму класі: наприклад, у класі Д (випрямляючі діоди) позначають як 1 -малопотужні, з $I_{пр.мах}$ до 0.3А; як 2 - великої потужності зі струмами більшими від 0.3А аж до 10А, тощо.

Четвертий елемент (дві цифри) - номер розробки у даному підкласі.

П'ятий елемент (літера) характеризує прилади даного типу за якимсь параметром. Наприклад, КД205Д - кремнійовий випрямляючий діод на великі струми ($I_{пр.мах} = 0.8А$) з $U_{звор. мах} = 100В$, а КД205Г з $U_{звор. мах} = 200В$; КС133А - стабілітрон кремнійовий з $r_d = 65$ Ом, а КС133Б - $r_d = 150$ Ом (хоча $U_{ст}$ у них однакова і дорівнює 3.3В).

Контрольні питання до розділу "Напівпровідникові діоди"

I. Що називають напівпровідниковим діодом?

2. Яка властивість $p-n$ переходу використовується для побудови випрямляючих діодів?
3. Чим відрізняються низькочастотні випрямляючі діоди від високочастотних?
4. Перелічте основні параметри, якими характеризуються випрямляючі діоди. Порівняйте за цими параметрами германійові та кремнійові випрямляючі діоди.
5. Яке фізичне явище лежить в основі роботи стабілітрона?
6. Що розуміється під терміном "стабілізація напруги"?
7. За рахунок яких особливостей вольтамперної характеристики стабілітрона відбувається стабілізація напруги в схемі, зображеній на рис.2.4 ?
8. Як впливав на коефіцієнт стабілізації величина навантажувального опору R_H , зображеного на рис. 2.4 пунктиром?
9. Чим визначаються межі області робочих струмів стабілітрона?
10. Чим відрізняється стабістер від стабілітрона?
11. Яке фізичне явище лежить в основі роботи варікапа?
12. Як залежить величина ємності варікапа від величини та полярності прикладеної напруги?
13. Чи впливають неосновні носії на роботу варікапа?
14. Які основні особливості вольтамперної характеристики тунельного діода?
15. У якій області частот знаходять застосування тунельні та обернені діоди? Для якої мети?
16. Розшифруйте позначення діодів. Намалюйте їх умовні зображення КД203Ж, 2ВЮ3А, ГИ307А, 2С433А, 3А703Б, КС2ПД, АДП0А, 2Д217Б.
17. До яких частот успішно працюватиме випрямляючий діод, якщо час життя дірок в його базі порядку 10 мкс?

Задачі до розділу.

- I. За мал.2.1 визначте омичний опір кремнієвого випрямляючого діода при $U_{пр} = 1,0$ В.
2. Чому дорівнюватиме омичний та диференціальний опір ідеального діода при $U = 0,1$ В? Зворотний струм діода $I_0 = 10$ мкА, температура 350 К.
3. Який буде граничний прямий допустимий струм для германійового діода, вольтамперна характеристика якого зображена на рис. 2.1, якщо він здатний розсіяти потужність в 0,1 Вт?
4. Якими будуть омичний та диференціальний опори стабілітрона, вольтамперна характеристика якого зображена на рис.2.3 в робочій точці "Б"?
5. Визначте крутість вольтфарадної характеристики варікапа $\frac{dC}{dU}$ зображеної на рис.2.5 в околиці точки $U = 5$ В?
1. Для стабілізатора, зображеного на рис.2.4 знайдіть значення опору R та коефіцієнта стабілізації при $U_1 = 18$ В та $U_2 = 10$ В. Параметри стабілітрона: $U_{CT} = 10$ В, $I_{\min} = 3$ мА, $I_{\max} = 23$ мА, $r_{df} = 15$ Ом.
2. Знайдіть границю стабілізації за вхідною напругою для схеми, розрахованої в завданні 2.б? Як вона зміниться, якщо стабілізатор навантажити опором $R_H = 1$ кОм ?